



تحلیل پارامتریک هیدروفویل زیر سطحی به روش المان مرزی

سینا افخمی^۱، محمود پسندیده فرد^{۲*} و مهدی نوروزی^۳^۱ کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی، مشهد^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد^۳ دانشجو دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۵/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

چکیده

یکی از مهمترین مسائل هیدرودینامیک کاربردی بررسی هیدروفویل متحرک در نزدیکی سطح آزاد است. در این مقاله به شبیه سازی جریان حول هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد به روش المان مرزی پرداخته شده است. برای شبیه سازی با استفاده از روش المان مرزی، از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده شده است. برای این منظور مسئله به دو قسمت هیدروفویل و سطح آزاد تقسیم شده و اثرات هریک بر دیگری محاسبه می شود و پتانسیل اختلالی روی سطح آزاد و هیدروفویل بدست می آید. سپس به کمک یک الگوریتم تکرار مقادیر پتانسیل ها در هر مرحله اصلاح می شوند تا جواب ها به مقادیر واقعی همگرا شوند. سپس به وسیله این پتانسیل ها توزیع فشار روی هیدروفویل همچنین منحنی موج روی سطح آزاد بدست می آید. پس از اعتبارسنجی این روش به بررسی عوامل مختلف روی عملکرد هیدروفویل از قبیل ضخامت و انحنای هیدروفویل، عدد فرود، زاویه حمله و ارتفاع از سطح آزاد و همچنین سهم نیرو های برا و پسای حاصل از امواج پرداخته شده است. مشاهده می شود که نتایج روش المان مرزی با وجود فرض سیال ایده آل، با تقریب خوبی، عملکرد جریان را پیش بینی می کند.

کلمات کلیدی: تئوری گرین؛ اثر سطح آزاد؛ روش المان مرزی؛ هیدروفویل دوبعدی.

Parametric Analysis of Subsurface Hydrofoil with Boundary Elements Method

S. Afkhami¹, M. Pasandideh-Fard^{2*}, M. Norozi³¹ Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.² Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.³ Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

One of the most important issues of applied Hydrodynamics is analysis of moving hydrofoils near the free surface. In this paper attention is being paid to the flow analysis of hydrofoil near the free surface. For this simulation, an iterative method based on Green's theorem is employed, and the problem is divided to hydrofoil and free surface and the effects on each other is calculated, and then perturbation potential on hydrofoil and free surface are acquired. Next, the values of these potentials are modified with an iterative algorithm until the results converge to real values. Then by having these potentials, pressure distribution on hydrofoil surface and curve wave on free surface are obtained. Having validated this method, various factors on the hydrofoil performance such as thickness, camber, angle of attack, the Froud number, distance from the free surface, and distance from depth are surveyed. It can be observed that the results of boundary element method with good approximation predict the flow performance, although the existence of an ideal fluid is assumed.

Keywords: Green's Theorem; Surface Effect; Boundary Elements Method; Two Dimension Hydrofoil.

۱- مقدمه

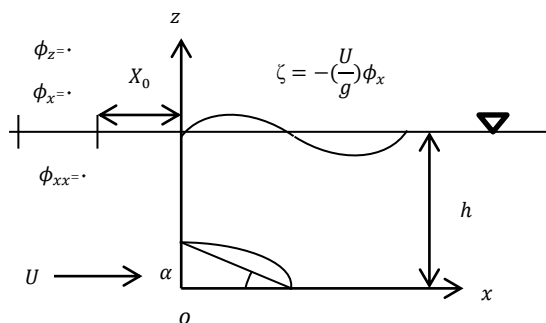
امروزه افزایش نیاز به استفاده از سیستم‌های دریایی، محققان را به سمت مطالعه و طراحی آن سوق داده است. شناورهای تندرو به عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های دریایی، در چند دهه اخیر کاربرد رو به گسترشی یافته است. با استفاده بیشتر از انواع این شناورها، نقاط ضعف و قوت هر یک مشخص شده و اصلاحاتی برای برطرف کردن عیوب آنها ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های افزایش سرعت شناورها استفاده از هیدروفویل است. شناور هیدروفویلی گونه‌ای از شناورهای تندرو است که علاوه بر قابلیت حرکت با سرعت بالا، دارای قدرت مانوردهی بالا، پایداری خوب و عملکرد مناسبی در برابر امواج است. بنابراین تحلیل عملکرد هیدروفویل‌ها اهمیت می‌یابد. در سالهای گذشته تحقیقاتی توسط افراد مختلف برای تعیین پتانسیل سرعت اجسام تحت شرط مرزی نیومن انجام گرفته است. هوگ و موران^۱ [۱] با استفاده از نظریه ایرفویل نازک جریان حول صفحه تخت و هیدروفویل را بررسی کردند. جسینگ و اسمیت^۲ [۲] با استفاده از توزیع چشمه بر روی سطح جسم شرط مرزی سینماتیکی روی جسم را ارضا کردند و برای سطح آزاد از شرط مرزی خطی شده در سطح آزاد استفاده کردند و در نهایت معادله انتگرال‌های بدست آمده را به صورت عددی محاسبه نمودند. بای^۳ [۳] از روش المان محدود برای حل عددی خود استفاده کرد و معادله انتگرال‌ها را با استفاده از روش گالرکین محاسبه نمود. یانگ و بوگر^۴ [۴] با استفاده از روش معادلات انتگرالی پیوندی بر اساس تئوری گرین و خطی کردن شرط مرزی سطح آزاد تحقیق خود را انجام دادند. سالواسن^۵ [۵] برای بررسی اثرات غیرخطی سطح آزاد از تئوری اختلالی مرتبه دوم استفاده کرد. کنل^۶ [۶] اثرات مرتبه دوم سطح آزاد را بر روی هیدروفویل نازک بررسی کرد. کووه^۷ و همکاران [۷] با استفاده از توزیع یکنواخت چشمه روی سطح آزاد و توزیع دابلت بر روی جسم و استفاده از شرط مرزی

دریسه به جای نیومن و خطی فرض کردن شرط مرزی سطح آزاد محاسبات خود را انجام دادند. بال^۸ [۸] با استفاده از توزیع چشمه و دابلت روی جسم و محاسبه معادلات انتگرالی با استفاده از تئوری گرین تحقیق خود را انجام داد. و برای ارضا شرط مرزی سطح آزاد از روش تصویرکردن استفاده کرد. داسکوفسکی^۹ و همکاران [۹] به بررسی نیروی برای تولیدی توسط هیدروفویل، به صورت نظری و تجربی پرداختند. بهبهانی نژاد و همکاران به بررسی غیردایم کایتاسیون جزیی به روش المان مرزی پرداختند [۱۰]. سعیدی نژاد^{۱۰} و همکاران به بررسی تجربی گردابه‌های ناشی از یک مدل زیر سطحی پرداختند [۱۱]. بورگوینه^{۱۱} [۱۲] در مطالعه ای آزمایشگاهی جریان دو بعدی حول هیدروفویل را مطالعه و عملکرد آن را از جنبه نیروهای برا و پسا و نیز گردابه‌های ایجاد شده در پشت هیدروفویل را مطالعه کرد. هی و ویسونو^{۱۲} [۱۳] با استفاده از شبکه تطبیقی به حل عددی سطح آزاد پرداختند و روش جدیدی را برای پیش‌بینی دقیق سطح آزاد ارائه کردند. کیم و یاماتو^{۱۳} [۱۴] سعی کردند امواج تولیدی توسط وسایل دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و از نوعی سیستم کنترلی استفاده کنند. زی و واسلوس^{۱۴} [۱۵] با استفاده از روش پتانسیل هیدروفویل سه بعدی را مطالعه کردند. سادات حسینی^{۱۵} و همکاران [۱۶] سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه سازی کردند. قاسمی^{۱۶} و همکاران اجسام برآزا را در نزدیکی سطح آزاد به روش المان مرزی تحلیل کردند [۱۷]. جوارشکیان^{۱۷} و همکاران [۱۸] به بررسی عوامل موثر بر عملکرد هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. بال^{۱۸} و کیناس [۱۹] با استفاده از جریان پتانسیل و توزیع چشمه و

⁸ Bal⁹ Daskovsky¹⁰ Behbahani-Nejad¹¹ Saeidi Nezhad¹² Bourgoyne¹³ Hay And Visonneau¹⁴ Kim And Yamato¹⁵ Xie And Vassalos¹⁶ Sadathosseini¹⁷ Djavareshkian¹⁸ Bal And Kinnas¹ Hough And Moran² Giesing And Smith³ Bai⁴ Yeung And Bouger⁵ Salvasen⁶ Kennell⁷ Kouh

$$F_c = \frac{U}{\sqrt{gc}} \quad (1)$$

به طوریکه منظور از (U) سرعت جریان آزاد، و (c) طول کورد هیدروفویل است.



شکل ۱- نمای دوبعدی هیدروفویل مغروق در نزدیکی سطح آزاد

مطابق رابطه (۲) پتانسیل کل را می توان با دو ترم اختلاالی و جریان آزاد نشان داد.

$$\Phi(x, z) = \phi(x, z) + Ux \quad (2)$$

منظور از (Φ) پتانسیل کل و (ϕ) پتانسیل اختلاالی است. مطابق رابطه (۳) پتانسیل کل واختلاالی هر دو باید معادله لاپلاس را ارضا کنند.

$$\nabla^2 \Phi = \nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

شرط های مرزی که می بایست ارضا شوند:

الف : شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم: برای این که سطح هیدروفویل خط جریان باشد، می بایست سرعت عمودی بر هیدروفویل برابر صفر باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{U} \cdot \vec{n} \quad (4)$$

به طوریکه منظور از \vec{n} بردار یکه نرمال بر سطح هیدروفویل است.

ب : شرط کوتا در لبه فرار هیدروفویل: مطابق با این شرط می بایست سرعت در لبه فرار هیدروفویل محدود باشد.

$$\nabla \phi < \infty \quad (5)$$

ج : شرط مرزی سینماتیکی روی سطح آزاد: ذرات سیال می بایست سطح آزاد را دنبال کنند.

$$\frac{DF(x, z)}{Dt} = 0 \quad z = h + \zeta(x) \quad (6)$$

منظور از ($F(x, z)$) تابعی است که سطح آزاد را توصیف می کند و منظور از ζ تابع منحنی موج می باشد. اگر از ترم های

دابلت بر روی سطح هیدروفویل و سطح آزاد محاسبات خود را انجام دادند. آنها مساله را به دو مساله سطح آزاد و هیدروفویل تقسیم کردند و با استفاده از یک روش تکرار اثرات هرکدام را بر دیگری اعمال کردند. بال [۲۰] با استفاده از روشی مشابه به بررسی همزمان اثرات سطح آزاد و کف در داخل یک تانک پرداخت. طحانی^۱ و همکاران [۲۱] به بررسی اثرات تغییرات هندسه بر مشخصات آیرودینامیکی بال شناور در نزدیکی سطح پرداختند.

در این مقاله برای تحلیل جریان حول یک هیدروفویل دو بعدی با سرعت ثابت و زاویه حمله مشخص در نزدیکی سطح آزاد از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده می شود. در این روش هیدروفویل و سطح آزاد به عنوان دو مسئله جداگانه در نظر گرفته می شوند و سطح هیدروفویل و سطح آزاد با المان هایی شامل چشمه و دابلت تقریب زده می شود، سپس اثرات هر یک روی دیگری محاسبه می شود. برای ارضا شرط مرزی روی سطح آزاد از ترکیب شرط مرزی سینماتیکی و دینامیکی روی سطح آزاد به صورت خطی شده استفاده می شود. با حل عددی معادله انتگرال ها، مقادیر مجهول پتانسیل های اختلاالی روی سطح آزاد و هیدروفویل بدست می آید و در هر تکرار اصلاح می شود، تا مسئله همگرا شود. بعد از اعتبار سنجی این روش به بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد هیدروفویل از قبیل ضخامت، انحنای زاویه حمله عدد فرود، نسبت ارتفاع به کورد تا سطح آزاد پرداخته شده است. همچنین نیروهای برا و پسای ناشی از امواج نیز مورد بررسی قرار گرفته شد.

۲- روش المان مرزی

برای شبیه سازی به روش المان مرزی فرض بر این است که کاویتاسیون رخ نمی دهد، همچنین جریان پایدار، غیرچرخشی، غیر قابل تراکم و غیرلزج می باشد. مطابق شکل ۱ هیدروفویل با زاویه حمله مشخص و در ارتفاع معین از سطح آزاد که جریان با سرعت ثابت به صورت یکنواخت با آن برخورد می کند، نشان داده شده است. در مسائل زیر سطحی سرعت بر حسب عدد فرود بیان می شود.

¹Tahani

۳- روش عددی

با بکارگیری تئوری سوم گرین برای سطح آزاد وهیدروفویل می توان نوشت :

$$\phi = \int_{S_{fs}+S_H} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \int_{S_w} \Delta \phi_w \frac{\partial \phi_s}{\partial n} ds \quad (14)$$

که منظور از ϕ_s پتانسیل یک چشمه به قدرت واحد در حالت دوبعدی است.

$$\phi_s = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln r \quad (15)$$

منظور از S_w ، S_{fs} ، S_H "به ترتیب سطح هیدروفویل، سطح آزاد و سطح دنباله می‌باشد". منظور از $(\Delta \phi_w)$ اختلاف پتانسیل روی سطح دنباله می باشد.

$$\Delta \phi_w = \phi_w^+ - \phi_w^- \quad (16)$$

۳-۱- الگوریتم حل

روش تکرار شامل دو قسمت میباشد، قسمت هیدروفویل که برای پتانسیلهای مجهول روی سطح هیدروفویل نوشته می شود و قسمت سطح آزاد که برای پتانسیلهای مجهول روی سطح آزاد نوشته می شود. طبق معادله (۱۷) پتانسیل اختلافی در میدان حل که ناشی از هیدروفویل می باشد به صورت زیر است.

$$\phi_H = \int_{S_H} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \int_{S_w} \Delta \phi_w \frac{\partial \phi_s}{\partial n} ds \quad (17)$$

همچنین طبق معادله (۱۸) پتانسیل اختلافی در میدان حل که ناشی از سطح آزاد می باشد به صورت زیر می باشد.

$$\phi_{fs} = \int_{S_{fs}} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds \quad (18)$$

با جاگذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۴) و همچنین جاگذاری معادله (۱۸) در معادله (۱۴) به دو معادله (۱۹) و (۲۰) می رسیم:

مرتبه دوم صرف نظر کنیم می توان شرط مرزی سینماتیکی را به صورت زیر نوشت.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = U \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad z = h \quad (7)$$

د : شرط مرزی دینامیکی روی سطح آزاد: فشار روی سطح آزاد باید برابر با فشار اتمسفر باشد. با نوشتن معادله برنولی روی سطح آزاد و صرف نظر کردن از ترم های مرتبه دوم خواهیم داشت:

$$U \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} + g \cdot \zeta = 0 \quad z = h \quad (8)$$

با ترکیب شرط مرزی دینامیکی و سینماتیکی روی سطح آزاد داریم:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = h \quad (9)$$

منظور از K_0 عدد موج است $(K_0 = \frac{g}{U^2})$.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود این شرط می بایست در پایین دست جریان و در فاصله ای در بالادست جریان (X_0) ارضا شود. بال [۱۹] به بررسی فواصل مختلف برای شرط مرزی تشعشعی پرداخت و نتیجه گرفت که طول مناسب برای ناحیه بالادست (X_0) باید نصف طول موج باشد ($X_0 = \Delta \lambda$). که منظور از λ طول موج ایجاد شده در سطح آزاد است.

$$\lambda = 2\pi \frac{U^2}{g} \quad (10)$$

هـ : شرط مرزی انتشار: به منظور جلوگیری از ایجاد موج در بالادست جریان می بایست مشتق اول و دوم پتانسیل اختلافی نسبت به جهت افق صفر باشد [۲۲].

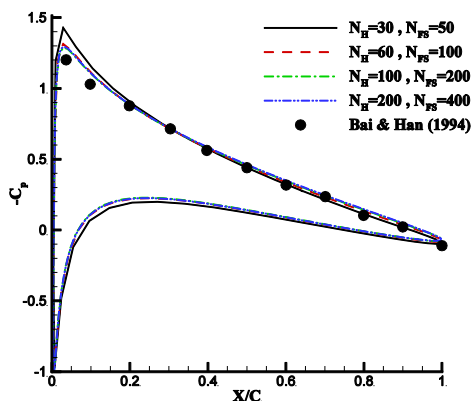
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad x \rightarrow -\infty \quad (11)$$

برای بدست آوردن ترم های مشتق مرتبه اول و دوم نسبت به محور افق از رابطه ارائه شده توسط داسون [۲۳] که بر مبنای طرح تفاضل محدود مرتبه چهارم است استفاده می کنیم.

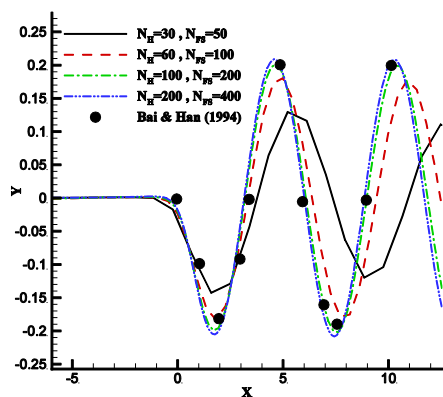
$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i = CA_i \phi_i + CB_i \phi_{i-1} + CC_i \phi_{i-2} + CD_i \phi_{i-3} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_i = CA_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i + CB_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{i-1} + CC_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{i-2} + CD_i \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{i-3} \quad (13)$$

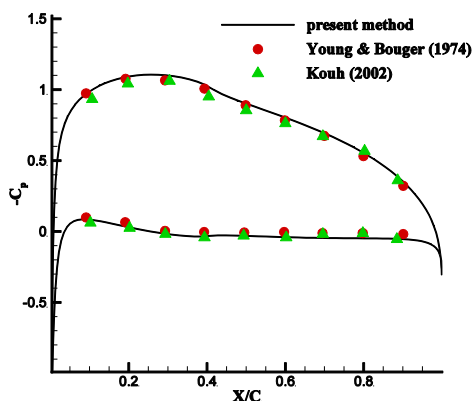
ضرایب بالا در مقاله داسون [۲۳] ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل جوکوفسکی در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۰/۹۵ و ارتفاع بی بعد برابر ۱



شکل ۳- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل جوکوفسکی در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۰/۹۵ و ارتفاع بی بعد برابر ۱



شکل ۴- نمودار توزیع ضریب فشار حول هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱

$$\phi = \int_{S_H} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \int_{S_w} \Delta \phi_w \frac{\partial \phi_s}{\partial n} ds + \phi_{fs} \quad (19)$$

$$\phi = \int_{S_{fs}} \left[\frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \phi_H \quad (20)$$

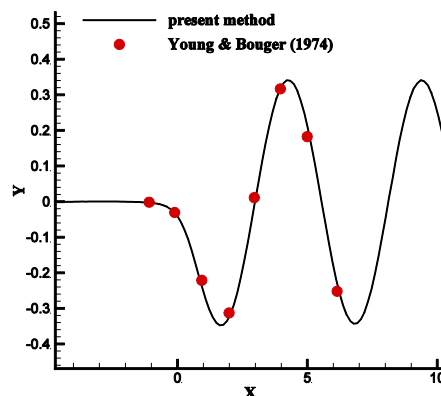
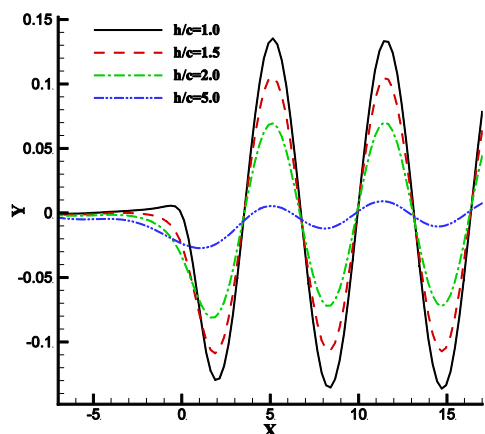
با حل تکراری این دو معادله به طوریکه ابتدا معادله (۱۹) بدون در نظر گرفتن ترم سطح آزاد حل می شود، سپس با استفاده از پتانسیل های بدست آمده از معادله (۱۹) پتانسیل ناشی از هیدروفویل در میدان جریان را با استفاده از معادله (۱۷) بدست می آوریم. در مرحله بعد معادله (۲۰) با در نظر گرفتن ترم ناشی از هیدروفویل که در مرحله قبل بدست آمد حل می شود، سپس با مقادیر پتانسیل جدید پتانسیل ناشی از اثر سطح از معادله (۱۸) بدست می آید. سپس دوباره معادله (۱۹) این بار با در نظر گرفتن اثر سطح حل می شود. این دو مرحله آنقدر تکرار می شود تا اختلاف بین پتانسیل محاسبه شده از دو معادله (۱۹) و (۲۰) ناچیز شود.

۴- نتایج روش المان مرزی

برای شبیه سازی عددی لازم است استقلال از شبکه بررسی شود، به این منظور جریان حول هیدروفویل جوکوفسکی با ضخامت ۱۲ درصد در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود ۰/۹۵ و ارتفاع بی بعد برابر ۱ با نتایج بای [۳] مقایسه شد.

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب نمودار توزیع ضریب فشار و منحنی موج در سطح آزاد به ازای تعداد المان های مختلف روی سطح آزاد و هیدروفویل می باشد. مشاهده می شود که در تعداد ۱۰۰ المان روی هیدروفویل و ۲۰۰ المان روی سطح آزاد جواب ها از تعداد المان ها مستقل می شوند.

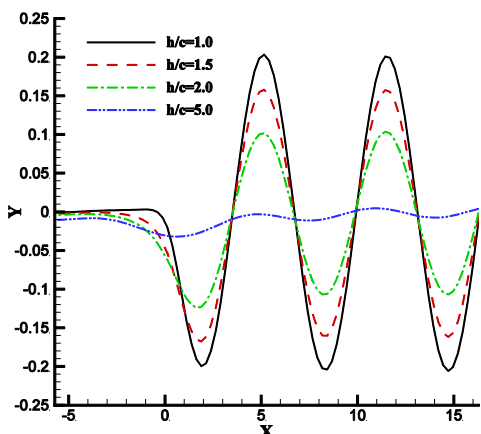
به منظور تایید درستی روش ارائه شده در این مقاله، مقادیر محاسبه شده با نتایج بدست آمده از کار یانگ و بوگر [۴] و همچنین نتایج کوه و همکاران مقایسه شده است. در شکل ۴ توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱ بدست آمده است. همچنین شکل ۵ منحنی موج ایجاد شده توسط هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱ است.



شکل ۵- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۰/۹، و نسبت ارتفاع به کورد برابر ۱

شکل ۷- منحنی موج در سطح آزاد برای ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۳ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی بعد مختلف

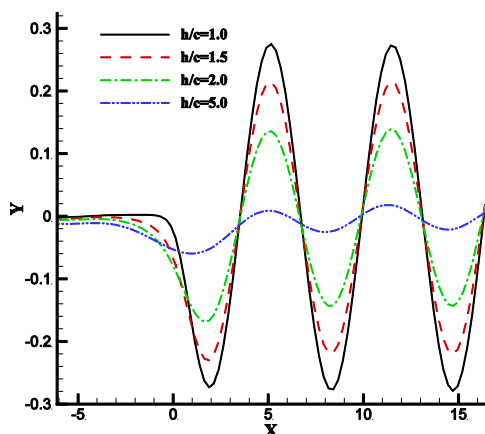
بعد از اطمینان از درستی روش حل به بررسی عوامل موثر بر عملکرد هیدروفویل در جریان زیر سطحی می پردازیم.



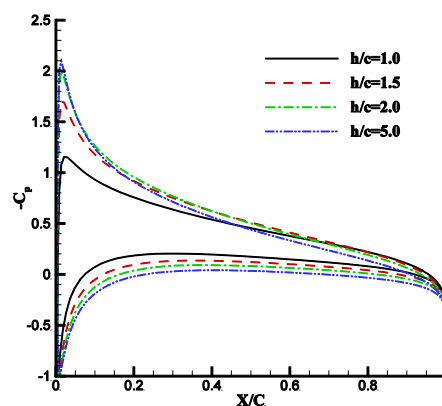
شکل ۸- منحنی موج در سطح آزاد برای ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی بعد مختلف

۴-۱- اثر ارتفاع از سطح آزاد

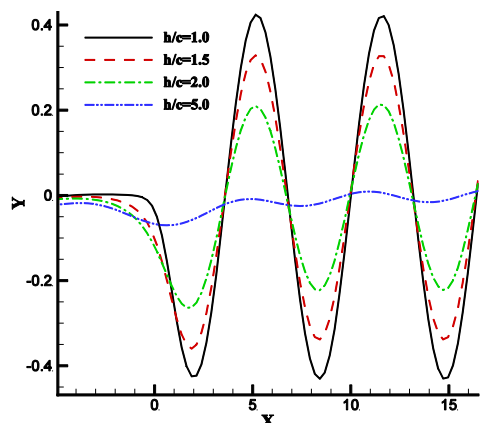
در ابتدا به بررسی اثر ارتفاع هیدروفویل تا سطح آزاد پرداخته شده است، به طوریکه به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر ارتفاع هیدروفویل از سطح آزاد، برای دو هیدروفویل متقارن و نامتقارن ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در زوایای حمله ۳، ۵ و ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های مختلف از سطح آزاد مطابق شکل‌های ۶ تا ۱۳ مورد بررسی قرار گرفته است.



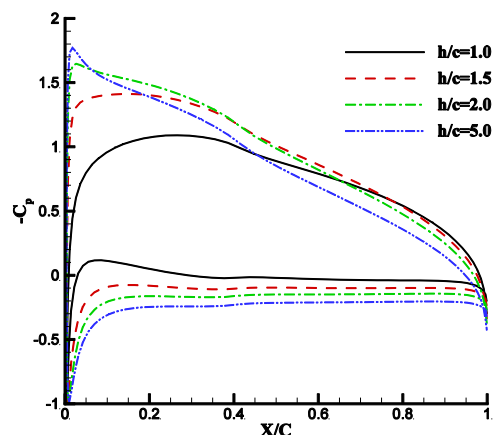
شکل ۹- منحنی موج سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی بعد مختلف



شکل ۶- توزیع ضریب فشار حول هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی بعد مختلف



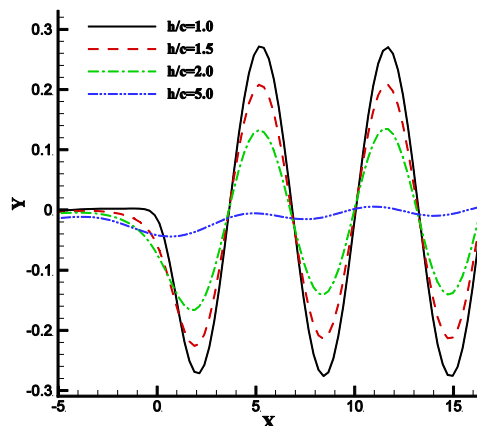
شکل ۱۳- منحنی موج سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۷ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف



شکل ۱۰- توزیع ضریب فشار هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف

جدول ۱- ضرایب برا و پسا ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲، زاویه حمله ۵ درجه و عدد فرود برابر ۱، ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف

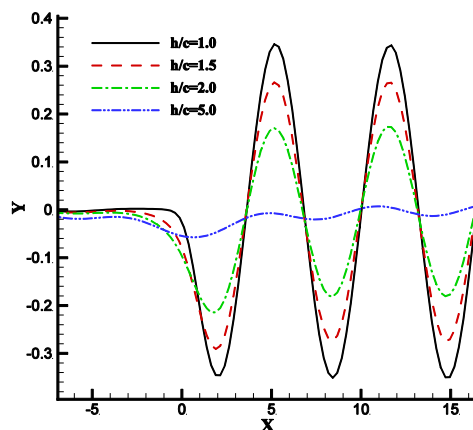
ضریب پسا	ضریب برا	ارتفاع بی‌بعد	هیدروفویل
۰/۰۲۲۱	۰/۳۹۵	۱/۰	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۱۳۷	۰/۵۴	۱/۵	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۰۶	۰/۶	۲/۰	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰	۰/۶	۵/۰	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۶۵۴	۰/۷۷	۱/۰	ناکا ۴۴۱۲
۰/۰۴۱۳۵	۱/۰۴۵	۱/۵	ناکا ۴۴۱۲
۰/۰۱۹	۱/۱۳	۲/۰	ناکا ۴۴۱۲
۰/۰۰۲۲	۱/۱۰	۵/۰	ناکا ۴۴۱۲



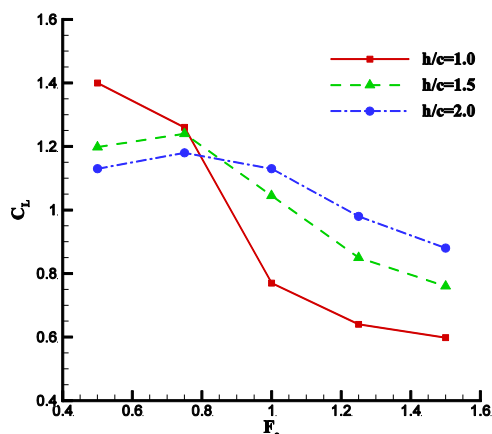
شکل ۱۱- منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۳ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف

مطابق شکل‌های ۶ و ۱۰ مشاهده می‌شود که برای هر دو هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد فشار روی سطح بالایی هیدروفویل افزایش می‌یابد. بنابراین مطابق جدول ۱ با نزدیک شدن به سطح آزاد ضریب برا کاهش و ضریب پسا افزایش می‌یابد.

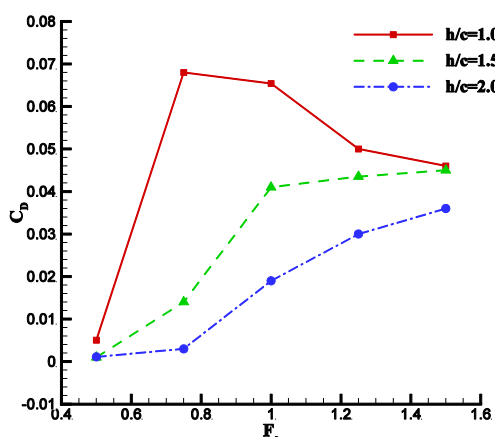
همچنین مطابق شکل‌های ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ وقتی عمق غوطه‌وری زیاد است انرژی زیادی از قدرت امواج مستهلک می‌شوند و در سطح آزاد موج با قدرت کمتری رخ می‌دهد. ولی وقتی عمق غوطه‌وری کمتر است انرژی کمتری در آب مستهلک می‌شود و موج با قدرت بیشتری در سطح آزاد رخ می‌دهد. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش عمق



شکل ۱۲- منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود ۱ و ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف



شکل ۱۶- ضریب برا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع های بی بعد مختلف

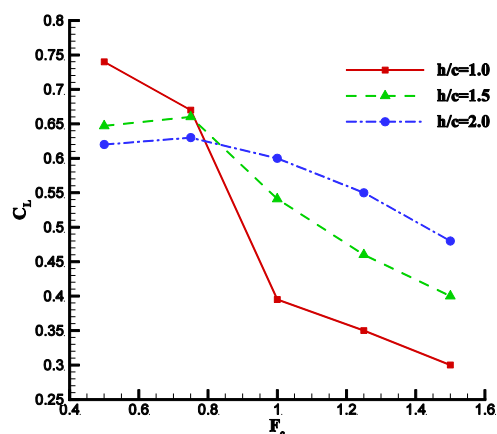


شکل ۱۷- نمودار ضریب پسا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع های بی بعد مختلف

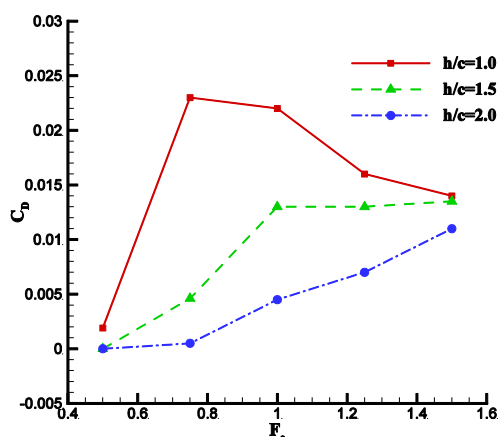
به طور کلی دو عاملی که باعث تغییر ضرایب آیرودینامیکی در جریان زیر سطحی می‌شوند: فشار هیدرواستاتیکی و امواج سطح آزاد هستند. اگر یک جسم دو بعدی را در نزدیکی سطح آزاد بدون موج در نظر بگیریم به طور طبیعی فشار وارد بر سطح زیرین این جسم به دلیل ارتفاع بیشتر از سطح آزاد، بیشتر است و این باعث تولید نیروی برا می‌شود. از طرفی اگر امواج روی سطح آزاد وجود داشته باشد همانطور که قبلا اشاره شد سیال بین هیدروفویل و سطح آزاد بیشتر محبوس شده و باعث افزایش فشار روی سطح بالایی هیدروفویل می‌شود و این باعث کاهش نیروی برا می‌شود. پس می‌توان این طور استدلال کرد که وقتی دامنه و قدرت امواج سطح آزاد کم باشد، هرچه هیدروفویل به سطح

آب تا حدود پنج برابر وتر هیدروفویل، می‌توان از اثرات سطح آزاد صرف نظر کرد. همچنین برای هردو هیدروفویل مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بزرگتر شده است.

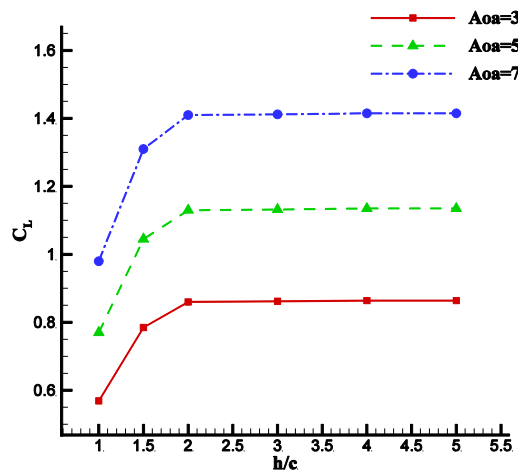
سیس به منظور بررسی دقیق تر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر ارتفاع بی بعد هیدروفویل تا سطح آزاد، مطابق شکل های ۱۴ تا ۱۷ ضرایب برا و پسا برای دو هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاع های بی بعد مختلف از سطح آزاد رسم شده است.



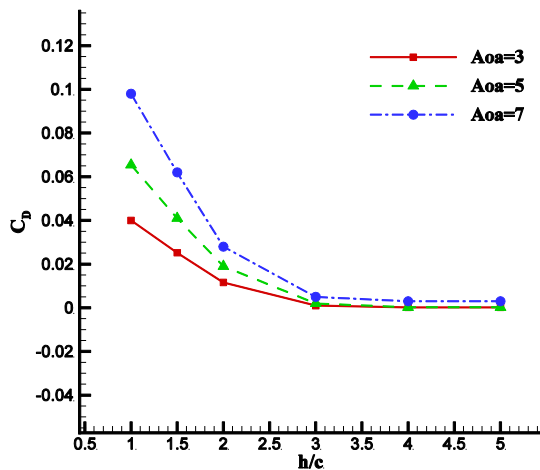
شکل ۱۴- نمودار ضریب برا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و نسبت ارتفاع های بی بعد مختلف



شکل ۱۵- ضریب پسا بر حسب عدد فرود هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، زاویه حمله ۵ درجه و نسبت ارتفاع های بی بعد مختلف



شکل ۲۰- نمودار ضریب برا بر حسب ارتفاع بی‌بعد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف

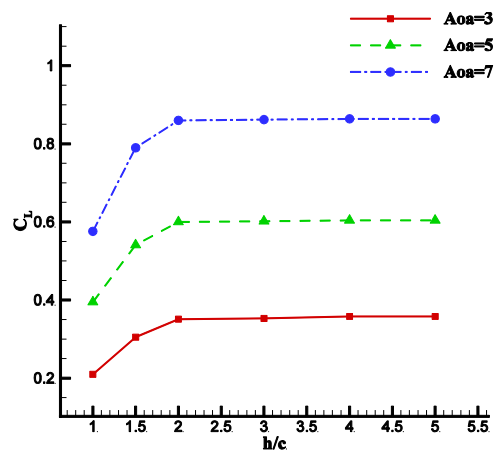


شکل ۲۱- نمودار ضریب برا بر حسب ارتفاع بی‌بعد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف

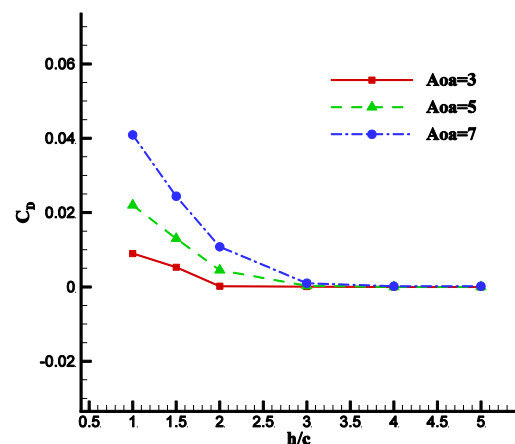
مطابق شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نمودارهای ضرایب برا و پسا به صورت تابعی از ارتفاع بی‌بعد در زوایای حمله مختلف رسم شده است.

مشاهده می‌شود که با دور شدن از سطح آزاد ضریب برا افزایش و ضریب پسا کاهش می‌یابد. البته این ضرایب از ارتفاع بی‌بعد حدود ۳ به مقداری ثابت همگرا می‌شود که این نشان‌دهنده کم‌رنگ شدن اثر سطح آزاد در این ارتفاع بی‌بعد می‌باشد.

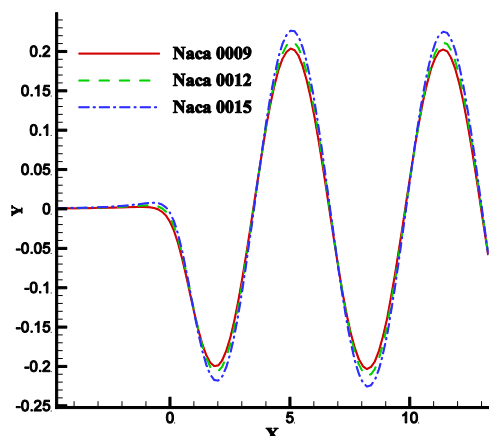
آزاد نزدیک‌تر شود به خاطر پرننگ‌تر شدن اثر فشار هیدرواستاتیکی نیروی برا افزایش می‌یابد. و هنگامی که امواج سطح آزاد قوی باشند به دلیل استهلاکی که ایجاد می‌کنند باعث افت نیروی برا می‌شوند. و با توجه به این که امواج تولیدی روی سطح آزاد به عدد فرود وابسته است (به طوریکه مطابق رابطه (۸) دامنه موج تولیدی روی سطح آزاد با توان دوم عدد فرود رابطه مستقیم دارد) از این رو مطابق شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد در اعداد فرود پایین ضریب برا افزایش و در اعداد فرود بالا ضریب برا کاهش می‌یابد. همچنین نیروی پسا با نزدیک شدن هیدروفویل به سطح آزاد، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸- نمودار ضریب برا بر حسب ارتفاع بی‌بعد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف



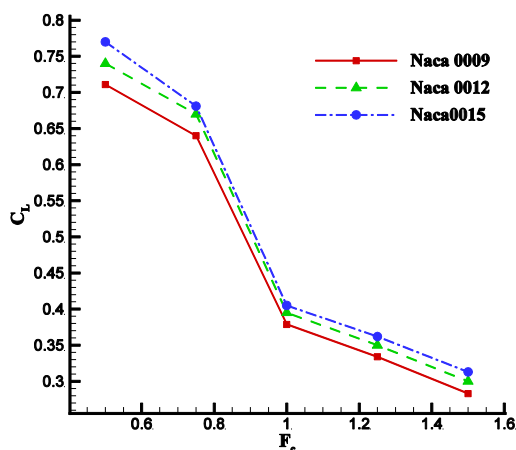
شکل ۱۹- نمودار ضریب پسا بر حسب ارتفاع بی‌بعد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، عدد فرود ۱ و در زوایای حمله مختلف



شکل ۲۳- نمودار منحنی موج در سطح آزاد هیدروفویل‌های ناکا با ضخامت‌های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی‌بعد برابر ۱

جدول ۲- مقادیر ضرایب برا و پسا هیدروفویل‌های ناکا با ضخامت‌های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی‌بعد برابر ۱

ضریب پسا	ضریب برا	هیدروفویل
۰/۰۱۹۲	۰/۳۷۸۸	ناکا ۰۰۰۹
۰/۰۲۲۱	۰/۳۹۵۰	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۲۵۳	۰/۴۰۵۱	ناکا ۰۰۱۵



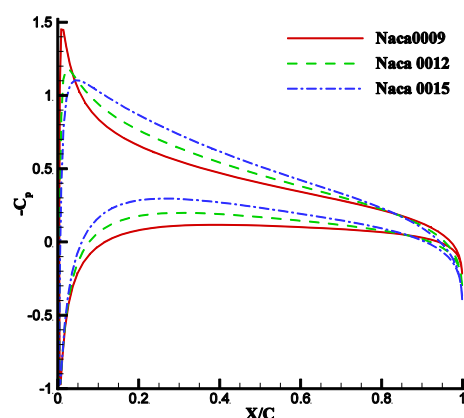
شکل ۲۴- نمودار ضریب برا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویل‌های ناکا با ضخامت‌های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بی‌بعد از سطح آزاد

۴-۲- اثر ضخامت هیدروفویل

پس از بررسی اثر زاویه حمله به بررسی اثر ضخامت هیدروفویل پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر ضخامت هیدروفویل، مطابق شکل‌های ۲۲ و ۲۳ سه هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹، ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۰۰۱۵ در ارتفاع بی‌بعد برابر ۱، عدد فرود برابر ۱ و زاویه حمله ۵ درجه مقایسه شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت هیدروفویل فشار در بالا و پایین هیدروفویل کاهش می‌یابد، که البته این کاهش فشار در سطح بالا بیشتر است. بنابراین مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت مقادیر ضرایب برا و پسا افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت هیدروفویل، دامنه موج هم افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش ضخامت هیدروفویل، فشار روی سطح بالایی کاهش بیشتری دارد و این تغییر فشار روی سطح بالایی سبب انتشار امواجی داخل آب می‌شود. بنابراین هرچه گرادیان فشار روی سطح هیدروفویل بیشتر باشد امواج منتشر شده قوی‌تر می‌باشند.

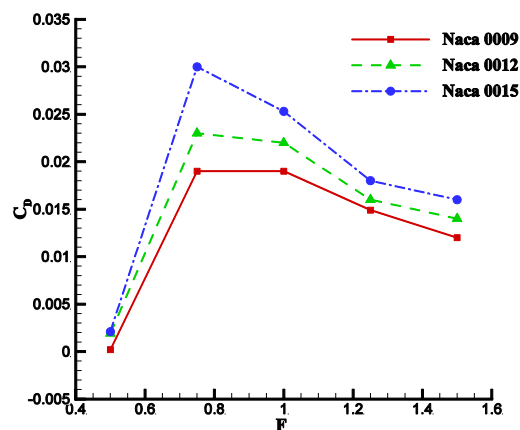
سیس به منظور بررسی دقیق تر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر ضخامت هیدروفویل، مطابق شکل‌های ۲۴ و ۲۵ ضرایب برا و پسا برای این سه هیدروفویل به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاع بی‌بعد ۱ از سطح آزاد رسم شده است.



شکل ۲۵- نمودار توزیع ضریب فشار هیدروفویل‌های ناکا با ضخامت‌های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی‌بعد برابر ۱

جدول ۳- مقادیر ضرایب برا و پسا آزاد برای سه هیدروفویل ناکا با انحنای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد ۱

ضریب پسا	ضریب برا	هیدروفویل
۰/۰۲۲۱	۰/۳۹۵	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۳۹۸	۰/۵۸۴۵	ناکا ۲۴۱۲
۰/۰۶۵۴	۰/۷۷	ناکا ۴۴۱۲



شکل ۲۵- نمودار ضریب پسا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویل‌های ناکا با ضخامت‌های مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بی بعد ۱ از سطح آزاد

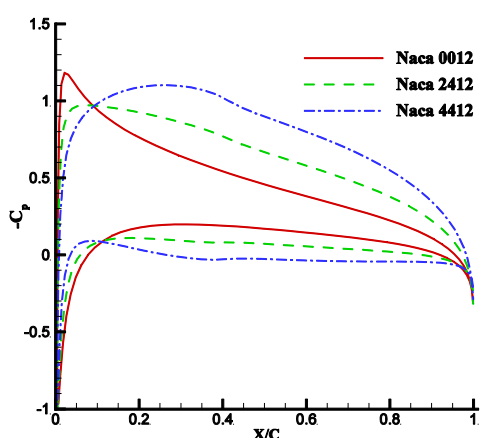
مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت در تمامی اعداد فرود باعث افزایش ضرایب برا و پسا می‌شود.

۳-۴- اثر انحنای هیدروفویل

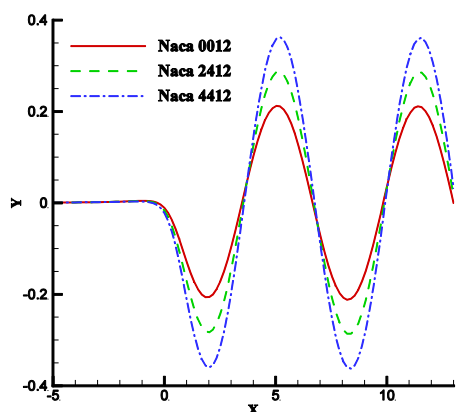
پس از بررسی اثر ضخامت هیدروفویل به بررسی اثر انحنای هیدروفویل پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر انحنای هیدروفویل، مطابق شکل‌های ۲۶ و ۲۷ سه هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در ارتفاع بی بعد برابر ۱، عدد فرود برابر ۱ و زاویه حمله ۵ درجه مقایسه شده است.

ملاحظه می‌شود که با افزایش انحنای فشار در سطح بالا کاهش و در سطح پایین افزایش می‌یابد که این اتفاق به این دلیل است که، سرعت روی سطح بالا افزایش و متعاقباً فشار روی این سطح کاهش می‌یابد و سیال در سطح پایین با مانع بزرگتری در تماس است که این موجب افزایش فشار می‌شود.

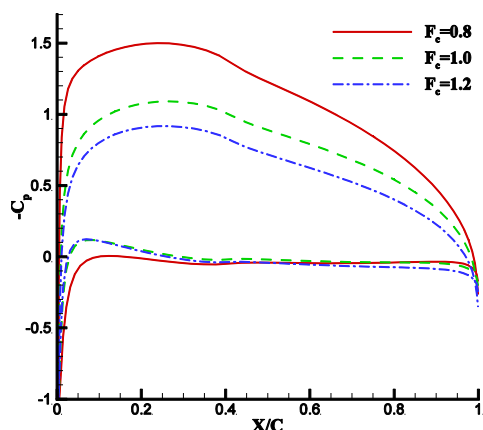
سپس به منظور بررسی دقیق تر تغییرات ضرایب آیرودینامیکی بر اثر تغییر انحنای هیدروفویل، مطابق شکل‌های ۲۸ و ۲۹ ضرایب برا و پسا را برای این سه هیدروفویل به صورت تابعی از عدد فرود در ارتفاع بی بعد ۱ از سطح آزاد رسم شده است.



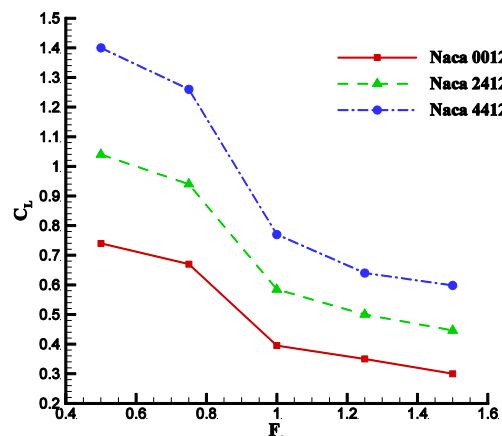
شکل ۲۶- توزیع ضریب فشار برای سه هیدروفویل ناکا با انحنای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه، عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد برابر ۱



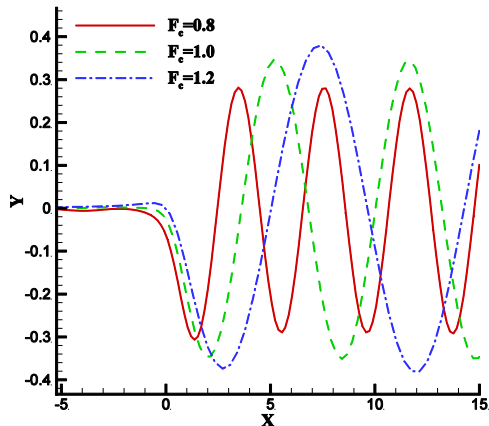
شکل ۲۷- نمودار منحنی سطح آزاد برای سه هیدروفویل ناکا با انحنای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه عدد فرود برابر ۱ و ارتفاع بی بعد ۱



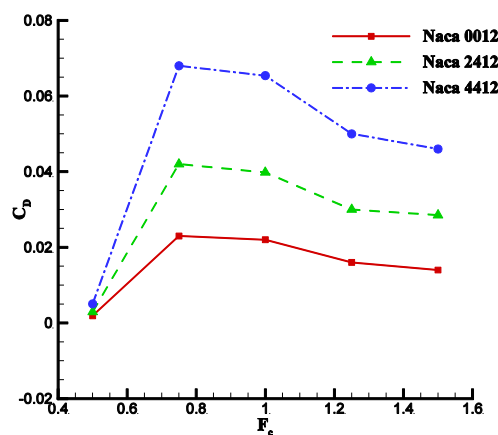
شکل ۳۰- نمودار توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله های مختلف و عدد فرود برابر او ارتفاع بی بعد ۱



شکل ۲۸- نمودار ضریب برا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویل های ناکا با انحنای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بی بعد ۱ از سطح آزاد



شکل ۳۱- نمودار منحنی موج در سطح آزاد برای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵ درجه و عددهای فرود مختلف و ارتفاع بی بعد ۱



شکل ۲۹- نمودار ضریب پسا بر حسب عدد فرود برای هیدروفویل های ناکا با انحنای مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و ارتفاع بی بعد ۱ از سطح آزاد

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود سطح بالایی هیدروفویل نیز دچار مکش می‌شود. مطابق رابطه (۸) ارتفاع موج ایجاد شده روی سطح آزاد با توان دوم عدد فرود نسبت مستقیم دارد، بنابراین با افزایش عدد فرود موج تشکیل شده روی سطح آزاد قوی تر شده و سرعت انتشار امواج ثقلی کاهش می‌یابد و همانطور که در جدول ۴ مشخص است، با افزایش عدد فرود ضرایب برا کاهش و ضریب پسا کاهش می‌یابد.

مشاهده می‌شود که افزایش انحنای در تمامی اعداد فرود باعث افزایش ضرایب برا و پسا می‌شود.

۴-۴- اثر عدد فرود

پس از بررسی اثر انحنای هیدروفویل به بررسی اثر عدد فرود بر جریان زیر سطحی پرداخته شده است. به منظور بررسی تغییرات منحنی ضریب فشار و همچنین تغییرات منحنی موج ایجاد شده در سطح آزاد بر اثر تغییر عدد فرود، مطابق شکل های ۳۰ و ۳۱ هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۵، ارتفاع بی بعد برابر او اعداد فرود مختلف مقایسه شده است.

سرعت جریان آزاد عدد فرود	U F_c	جدول ۴- مقادیر ضرایب برا و پسا برای هیدروفویل ناکا در ارتفاع های بی‌بعد مختلف در زاویه حمله ۵ درجه و اعداد فرود مختلف		
		عدد فرود	ضریب برا	ضریب پسا
چگالی (kgm^{-3})	ρ	۰/۸	۱/۰۵	۰/۰۷
پتانسیل کل	Φ	۱/۰	۰/۷۷	۰/۰۶۵۴
پتانسیل اختلالی	ϕ	۱/۲	۰/۶۳	۰/۰۵۳۹
تابع منحنی موج	ζ			
	زیر نویس‌ها			
سطح آزاد	F_s			
هیدروفویل	H			
دنباله	W			

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد با استفاده از روش المان مرزی پرداخته شد. برای تحلیل به روش المان مرزی از یک روش تکرار مبتنی بر تئوری گرین استفاده شد، به طوریکه مسئله به دو قسمت هیدروفویل و سطح آزاد تقسیم شد، و هرکدام از قسمت‌ها جداگانه حل شدند، سپس اثرات هر کدام از قسمت‌ها بر دیگری محاسبه شده و با استفاده از یک روش تکرار، پتانسیل اختلالی روی سطح آزاد و هیدروفویل بدست آمد آنگاه به وسیله این پتانسیل‌ها توزیع فشار روی سطح هیدروفویل بدست آمد. همچنین منحنی موج تشکیل شده روی سطح آزاد بدست می‌آید. پس از اعتبارسنجی این دو روش به بررسی عوامل مختلف روی عملکرد هیدروفویل از قبیل ضخامت هیدروفویل، عدد فرود، زاویه حمله و ارتفاع بی‌بعد از سطح آزاد پرداخته شده است. مشاهده گردید که با افزایش ضخامت و هیدروفویل ضرایب برا و پسا افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه حمله جریان ضرایب برا و پسا افزایش می‌یابد. همچنین نزدیک شدن به سطح آزاد در اعداد فرود بالا ضریب برا کاهش و ضریب پسا افزایش می‌یابد ولی در اعداد فرود پایین با نزدیک شدن به سطح آزاد ضرایب برا و پسا افزایش می‌یابد. به علاوه در ارتفاع های مختلف از سطح آزاد، با افزایش عدد فرود، ضریب برا کاهش می‌یابد و ضریب پسا افزایش می‌یابد.

۶- علایم، نشانه‌ها و ارقام

شتاب گرانش	G
طول کورد	c

۷- مراجع

- [1] Hough GR, Moran SP (1969) Froude number effects on two dimensional hydrofoils. J Ship Res 13: 53-60.
- [2] Giesing JP, Smith AM (1967) Potential flow about two-dimensional hydrofoil. J Fluid Mech 28: 113-120.
- [3] Bai KJ (1978) Alocalized finite-element method for two-dimensional steady potential flow swith free surface. J Ship Res 22: 216-230.
- [4] Yeung RW, Bouger YC (1979) Ahybrid -integral equation method for steady two dimension ship wave. Int J Numer Method Eng 14: 317-336.
- [5] Salvasen N (1969) On higher-order wave theory for submerged two-dimensional bodies. J Fluid Mech 38: 415-432.
- [6] Kennell C, Plotkin A (1984) A second order theory for the potential flow about thin hydrofoils. J Ship Res 28: 55-64.
- [7] Kouh JS, Lin TJ, Chau SW (2002) Preformance analysis of two-dimension hydrofoil under free surface. J Nat Tai Uni 86: 113-123.
- [8] Bal S (1999) A potential based panel method for two-dimensional hydrofoil. Int J Ocean Eng 28:243-261.
- [9] Daskovsky M (2000) The hydrofoil in surfaceproximity theory and experiment. Ocean Eng 27: 1129-1159.
- [10] Behbahani-Nejad Changizian M (2013) Reduced-Order modeling of unsteady partial cavity flows using the boundary element method. Modares Mech Eng 13(6): 140-152. (In Persian)
- [11] Saeidi Nezhad A, Dehghan AA, Manshadi M, Kazemi Esfeh M (2013) Experimental investigation of the vortex structure on a submersible model. Modares Mech Eng 13(15): 98-109. (In Persian)
- [12] Bourgoyne Dwayne A (2003) Flow over ahydrofoil with trailing edge vortex shedding athigh

- [18] Djavarehshkian MH, Esmali ali (2012) Parametric analysis of hydrofoil performance near the free surface. Hydraulic 6(4): 1-17. (In Persian)
- [19] Bal S, Kinnas S (2003) A numerical wave tank model for cavitating hydrofoils. J Comput Mech 259-268.
- [20] Bal S (2011) The effect of finite depth on 2D and 3D cavitating hydrofoils. J Mar Sci Technol 129-142.
- [۲۱] طهانی م، برگستان ع (۱۳۹۳) بررسی عددی اثرات تغییر هندسه بر ضرایب آیرودینامیکی بال شناور اثر سطحی. نشریه علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۴(۲): ۷۵-۸۷.
- [22] Nakos DE, Sclavounos PD (1990) On steady and unsteady shipwave patterns. J Fluid Mech 215: 263-288.
- [23] Dawson DW (1977) A practical computer method for solving shipwave problems. 2nd International Conference on Numerical ShipHydrodynamics. Reynolds number, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Michigan.
- [13] Hay A, Visonneau M (2005) Computation of free-surface flows with local mesh adaptation. Int J Numer Meth Fl 49: 785-816.
- [14] Kim SH, Yamato H (2005) The estimation of wave elevation and wave disturbance caused by the wave orbital motion of a fully submerged hydrofoil craft. J Mar Sci Technol 10: 22-31.
- [15] Xie N, Vassalos D (2007) Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface. J Ocean Eng 34: 1257-1264.
- [16] Sadathosseini SH, Mousaviraad SM, Firoozabadi B, Ahmadi G (2008) Numerical simulation of free-surface waves and wave induced separation. Scientia Iranica 15(3): 323-331.
- [17] Ghassemi H, Kohansal A (2010) Boundary element method applied to the lifting bodies near the free surface. J Mar Eng 5(10):105-113.