

بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدروفویل در نزدیکی سطح آب

محمدحسن جوارشکیان^{۱*}، علی اسماعیلی^۲

۱- دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مشهد، کد پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴

javareshkian@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده- در این تحقیق، تأثیر ضخامت، انحنا، عمق فرورفتگی و سرعت حرکت هیدروفویل غوطه‌ور در آب با روشی عددی مطالعه شده است. این روش عددی بر الگوریتم فشار مبتنی بوده و از SIMPLE برای حل معادلات ناویراستوکس، و از VOF برای شبیه‌سازی دو فاز آب و هوا استفاده می‌شود. از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و طرح مرتبه دوم بالادست برای طرح‌های تفاضلی استفاده شده است. به منظور بررسی صحت روند حل عددی، قسمتی از نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی موجود در مقالات مقایسه و روند شبیه‌سازی تأیید شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت هیدروفویل ضرایب برا و پسا بیشتر می‌شوند، اما نسبت برا به پسا روندی کاهشی دارد. از طرفی با افزایش انحنا، هر چند که ضریب برا و پسا افزایش می‌یابد، اما نسبت برا به پسا نیز روند صعودی دارد؛ لذا در انتخاب مقطع مناسب برای هیدروفویل‌ها، هر چه ضخامت کمتر و انحنا بیشتر باشد، عملکرد هیدرودینامیکی مطلوبتر می‌شود. تغییر مقطع هیدروفویل حتی بر جریان هوا و لایه مرزی تشکیل شده بر سطح آب نیز تأثیر می‌گذارد. همچنین با افزایش عمق و زاویه حمله، ضریب برا و پسا روندی رو به رشد دارند که منجر به افزایش نسبت برا به پسا می‌شود. با افزایش سرعت، ضرایب برا و پسا کاهش می‌یابد و در مجموع نسبت برا به پسا نیز کم می‌شود.

کلیدواژگان: هیدروفویل، موج، برا، پسا، عملکرد هیدرودینامیکی.

۱- مقدمه

افزایش نیاز به استفاده از سیستم‌های دریایی، محققان را به سمت مطالعه و طراحی آنها سوق داده است. شناورهای تندرو به‌عنوان 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 شناخته شده از شناورهای تندرو است که علاوه بر قابلیت حرکت با سرعت بالا، قدرت مانور بالا، پایداری خوب و عملکرد مناسبی در

Kouh et al. (2002) به تحلیل عملکرد هیدروفویل دو بعدی در سطح آزاد پرداختند. (Rhee et al. (2003) هیدروفویل دارای بالچه را تحلیل کردند. در همین سال Bourgoyne در مطالعه‌ای 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 مطالعه کرد (Bourgoyne, 2003).

Chen and Liu (2005) با در نظر گرفتن توزیع دابلت بر روی سطح داخلی جسم به بررسی جریان پرداختند. (Hay and Visonneau (2005) با استفاده از شبکه تطبیقی به حل عددی جریان سطح آزاد پرداختند و روش جدیدی را برای پیش‌بینی دقیق سطح آزاد ارائه کردند. مطالعات وسیعی در سال‌های اخیر در زمینه هیدروفویل‌ها انجام شده است. (Carcatera et al. (2005) هیدروفویل نوسانی را به صورت تحلیلی حل کردند.

Kim and Yamato (2005) سعی کردند امواج تولیدی توسط وسایل دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و در نوعی سیستم کنترلی استفاده کنند.

Xie and Vassalos (2007) با استفاده از روش پتانسیل هیدروفویل سه‌بعدی را مطالعه کردند. در سال ۲۰۰۸، سادات حسینی و همکاران سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. (Ducoin et al. (2009) به بررسی تحقیقات عددی و تجربی در زمینه جریان بر روی هیدروفویل پرداختند و پدیده لایه مرزی، جدایش جریان، تبدیل جریان از آرام به آشفتگی و نیز پدیده واماندگی را تحلیل کردند. (Munch et al. (2010) به بررسی اثر متقابل سیال و سازه در هیدروفویل نوسانی کاملاً غرق شده پرداختند. (Zanette et al. (2010) اثر جریان عبوری از پره‌های توربین آبی را بررسی کرده‌اند.

در تحقیقات انجام شده تاکنون با استفاده از روشهای تحلیلی، عددی و تجربی، پدیده‌های مختلفی در جریان

برابر امواج دارد. بنابراین تحلیل عملکرد هیدروفویل‌ها اهمیت می‌یابد. وقتی عمق فرورفتگی هیدروفویل کم شود، اثر سطح آزاد اهمیت یافته و باید در محاسبات در نظر گرفته شود. تاریخچه استفاده از هیدروفویل به سال ۱۸۹۸ باز می‌گردد. در آن سال فورلانی در ایتالیا تلاش کرد که برای افزایش سرعت قایق از هیدروفویل‌ها استفاده کند. (Guidoni (1911) نیز هیدروفویل را در وسایل پرنده دریایی جایگزین کرد. مزیت هیدروفویل تولید نیروی برا است که بر اثر حرکت نسبی بین آن و سیال لزج غیر قابل تراکم ایجاد می‌شود. به همین دلیل برای طراحی صحیح به مطالعات بیشتری نیاز است. معادلات حاکم بر این جریان‌ها در آن سال‌ها شناخته شده بود، اما پیچیدگی هندسه و نیز ویژگی‌های جریان سبب شد که این معادلات به‌سادگی قابل حل نباشند. لذا از مدل‌های تئوری برای شناخت بیشتر مسأله استفاده کردند. به‌طوری که جریان پتانسیل و نیز روش تصویر توسط Wadlin et al. (1937)، Vladimirov (1951)، Kotchin (1951) و دیگران توسعه داده شد.

Bai and Han (1994) به روش المان محدود جریان را حول هیدروفویل دو بعدی در شرایط خطی و غیرخطی سطح آزاد حل کردند. (Blasi et al. (2000) به مطالعه تجربی شکست امواج پشت هیدروفویل‌های غرق شده با استفاده از LDV پرداختند. (Daskovsky (2000) اثر نزدیکی سطح نیروی برای تولیدی توسط هیدروفویل را به‌طور تجربی و نظری بررسی کرد. نتایج حاکی از آن است که کاهش نیروی برا در عمق‌های کمتر از دو برابر طول وتر هیدروفویل، نسبت به عمق‌های بیشتر محسوس است (Daskovsky, 2000).

Filippov (2001) جریان پایای عبوری از هیدروفویل را به صورت تحلیلی و با استفاده از روش اختلال^۱ حل کرد.

1. Perturbation

گسسته‌سازی شده و توسط الگوریتم فشار مینا به روش ضمنی حل می‌شوند.

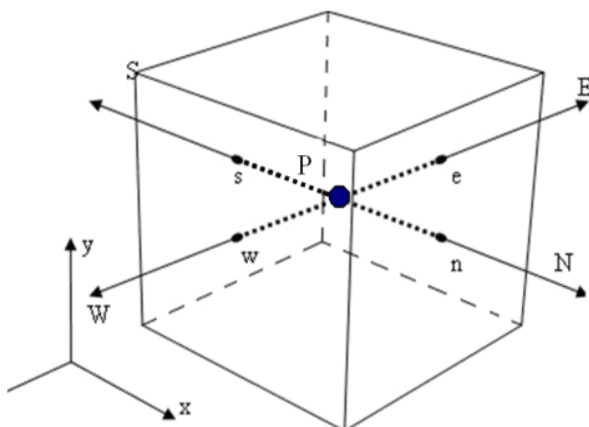
۲-۲- گسسته‌سازی

طبیعت معادلات اساسی به گونه‌ای است که می‌توان با انتگرال‌گیری کلی روی حجم‌های کنترل، مجهولات مسأله را به دست آورد و به تحلیل جریان پرداخت. از آنجا که در بیشتر موارد، این انتگرال‌گیری به صورت تحلیلی مشکل است، از روش عددی استفاده می‌شود. برای حل عددی به گسسته‌سازی معادلات نیاز است که با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌شود. نخست دامنه حل^۲، به تعدادی حجم گسسته یا سلول‌ها تقسیم می‌شود، به طوری که تمامی متغیرها در مرکز سلول‌ها ذخیره شوند. سپس این معادلات برای تمامی حجم‌های کنترل بر اساس نظریه^۳ گوس به کار گرفته می‌شود. برای هر متغیر ϕ (که می‌تواند مؤلفه‌های سرعت باشد) شکل کلی معادلات چنین است:

$$I_e - I_w + I_n - I_s = S_\phi \delta v \quad (6)$$

که I ترکیبی از جمله^۲ جابه‌جایی^۳ و جمله^۴ نفوذ^۴ است. شار نفوذ به وسیله تفاضل مرکزی بیان می‌شود و می‌توان آن را برای سطح سلول مثل e در شکل ۱ به صورت زیر نوشت:

$$I_e^D = D_e(\phi_P - \phi_E) - S_e^D \quad (7)$$



شکل ۱ حجم کنترل یک سلول و وجوه آن

2. Domain
3. Convection - I^C
4. Diffusion - I^D

حول هیدروفویل در نزدیکی سطح آب بررسی شده، اما در کارهای انجام شده کمتر به بررسی تأثیر ضخامت و انحنای هیدروفویل، فاصله آن تا سطح آزاد و سرعت جریان بر ضرایب هیدرودینامیکی با شبیه‌سازی جریان لزج و آشفته پرداخت شده است. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی جریان لزج و آشفته حول هیدروفویل در نزدیکی سطح آب به منظور بررسی تأثیر ضخامت، انحنای هیدروفویل، فاصله تا سطح آزاد و سرعت جریان بر پدیده‌های جریان و ضرایب هیدرودینامیکی است. همچنین تأثیر ضخامت و انحنای هیدروفویل بر موج تشکیل شده در سطح آزاد و نیز اثر آنها بر جریان پشت هیدروفویل مطالعه شده است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات اساسی

معادلات اساسی بقای جرم، مومنتم و اسکالر درحالت برداری و مستقل از سیستم مختصات به صورت زیر است (Javareshkian et al., 2011):

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j - T_{ij})}{\partial x_j} = S_i^u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \phi - q_j)}{\partial x_j} = S_\phi \quad (3)$$

تانسور تنش و بردار اسکالر شار^۱ بر اساس متغیرهای وابسته بیان می‌شوند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی به شکل زیر است:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

ρ چگالی، u بردار سرعت و ϕ نوعی متغیر مستقل اساسی (انرژی) است. \vec{q} بردار شار اسکالر است و از قانون فوریه به دست می‌آید:

$$\vec{q} = \Gamma_\phi \text{grad}\phi \quad (5)$$

معادلات (۱)، (۲) و (۳) به روش حجم محدود

1. Flux

است. لزجت توربولانسی (μ_t) و ترم پخش توربولانسی (Γ_ϕ^t) معادلات فوق از روابط زیر به دست می آیند:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$\Gamma_\phi^t = \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi^t} \right) \quad (13)$$

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به دلیل سادگی در همگرایی و پایداری خوب انتخاب شده است. در این تحقیق بیشینه زاویه حمله برابر $7/5^\circ$ درجه است و در این حالت جدایش قوی وجود نداشته و جریان، چرخشی و پیچیده نیست. به همین دلیل این مدل آشفتگی انتخاب شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می دهد که این مدل مناسب است. از سوی دیگر مقالات دیگری هم که جریان حول هیدروفویل را به صورت عددی حل کرده اند به انتخاب مدل $k-\varepsilon$ تأکید داشتند (Zanette et al., 2010; Liu et al., 1994). برای مدل سازی جریان دو فازی از روش VOF استفاده شده است. در روش VOF، در محل تماس دو فاز، معادله پیوستگی درصد حجمی برای یک یا هر دو فاز حل می شود. اگر تعداد فازها برابر q باشد این معادله چنین است (اسماعیلی، ۱۳۹۰):

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (14)$$

که در آن \dot{m}_{pq} دبی جرمی انتقال یافته از فاز p به فاز q و \dot{m}_{qp} دبی جرمی انتقال یافته از فاز q به فاز p است. $S_{\alpha q}$ جمله چشمه بوده و در این مسأله برابر صفر است. α بیانگر درصد حجمی در هر سلول از فاز q است. معادله درصد حجمی برای فاز اولیه قابل حل نیست. بنابراین درصد حجمی فاز اولیه از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (15)$$

معادله درصد حجمی را می توان به هر دو روش ضمنی و صریح حل کرد که در این تحقیق به روش ضمنی حل شده است.

گسسته سازی شار جابه جایی به توجه ویژه نیاز دارد و این، موضوع توسعه طرح های تفاضلی مختلف شده است. در مسائلی که در آن جمله جابه جایی وجود دارد، لازم است خاصیت مورد بررسی بر روی سطح سلول به دست آید. اما محل دخیله سازی کمیت ها بر روی سطح سلول ها نیست، بلکه در مرکز سلول ذخیره می شوند. به همین دلیل روش های مختلفی برای به دست آوردن مقدار خاصیت در سطح سلول وجود دارد.

شار جابه جایی برای سطح سلول e به شکل زیر است:

$$I_e^c = (\rho VA)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (8)$$

که F_e جمله جابه جا شده در واحد سطح سلول و ϕ_e مقدار خاصیت در سطح سلول است که مقدار آن را با روش های مختلفی می توان به دست آورد. در این تحقیق از روش تفاضلی بالادست مرتبه دوم برای به دست آوردن جمله های جابه جایی استفاده شده است. با قرار دادن جمله نفوذ و جابه جایی در معادله گسسته شده، نتایج معادلات گسسته شده برای هر تقریبی به شکل زیر است:

$$a_p \phi_p = \sum_{m=E,W,N,S} a_m \phi_m + S_\phi^t \quad (9)$$

که a شامل ضرایب نفوذ و جابه جایی است (Javareshkian et al., 2011).

اکنون با گسسته سازی معادلات حاکم می توان جریان را حل کرد. در این تحقیق، معادلات حاکم به روش بالا گسسته سازی می شود. سپس بر اساس روش فشار مبنا و بر پایه الگوریتم SIMPLE جریان حول بال واره حل می شود.

مدل آشفتگی که در این تحقیق در نظر گرفته شده $k-\varepsilon$ بوده و معادلات حاکم بر آن به صورت زیر است (Javareshkian et al., 2012):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = G - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad (11)$$

C_1 و C_2 ضرایب ثابت مدل و پارامتر G معرف تولید انرژی جنبشی اغتشاش در اثر گرادیان های سرعت متوسط

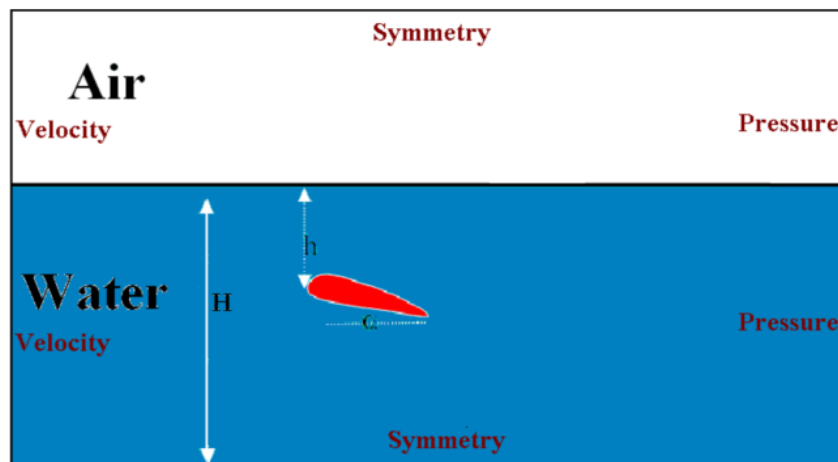
۳- نتایج

۱-۳- شبکه بندی و شرایط مرزی

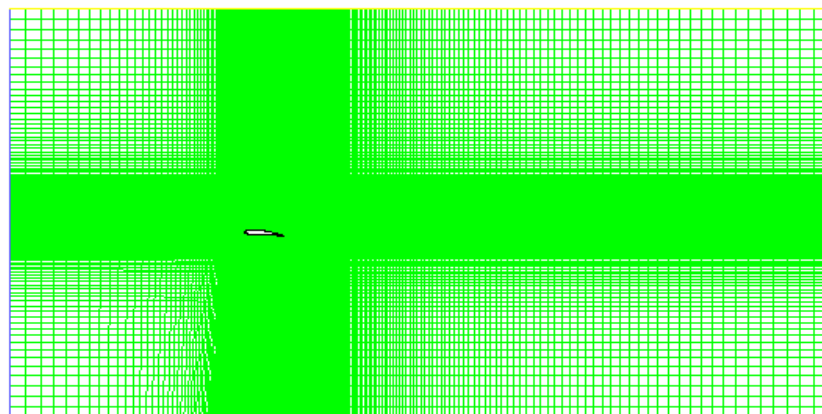
در این تحقیق به شبیه سازی هیدروفویل دو بعدی که در نزدیک سطح آب و دور از بستر حرکت می کند پرداخته شده است. کشش سطحی برای فصل مشترک فاز آب و هوا در نظر گرفته شده و همچنین سطح هیدروفویل صاف در نظر گرفته شده است. حوزه حل جریان در شکل ۲ نشان داده شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده چنین است: سرعت در مرز ورودی برای هر دو فاز و فشار استاتیک در مرز خروجی به عنوان شرط مرزی فیزیکی در نظر گرفته شده است؛ برای فاز آب شرط فشار استاتیکی اعمال شده است؛ مرز مشترک بین دو فاز، به عنوان شرط مرزی داخل و برای سطح بالا و پایین نیز از

شرط مرزی تقارنی استفاده شده است. شبکه ای که در اینجا استفاده شده از نوع H بوده و ابعاد حوزه حل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است (شکل ۳). از آنجا که جریان دو فازی و در فاز آب فشار هیدرواستاتیکی نیز در نظر گرفته شده و همچنین لایه های بالایی آب بر لایه های زیرین اثر دارد، این نوع شبکه بندی مناسب تر است.

همچنین در مدل سازی این نوع شبکه بندی بهتر می توان مناطق فاز های مختلف را جدا کرد و در کد عددی نیز تعریف ناحیه ها ساده تر است. البته در مقالات متعددی نیز که به بررسی پدیده های نزدیک سطح پرداخته اند از این نوع شبکه بندی استفاده شده است.



شکل ۲ حوزه حل و شرایط مرزی جریان



شکل ۳ نحوه شبکه بندی حول هیدروفویل

شود. بنابراین، جریان حول هیدروفویل NACA 4412 (Abbott and Doenhoff, 1959) برای سه شبکه مختلف حل شد. عدد فرود جریان $Fc=1$ (طول مشخصه برابر وتر هیدروفویل است)، سرعت جریان $V=3.13$ m/s، عمق فرورفتگی $h/c=1$ و زاویه حمله هیدروفویل برابر ۵ درجه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از توزیع فشار (C_p) بر روی سطوح هیدروفویل مورد نظر در شکل ۴ دیده می‌شود، برای تعداد سلول برابر ۸۴۰۰۰ مسئله به وضعیت استقلال رسیده و با ریزتر کردن شبکه تغییر چندانی در ضریب فشار ایجاد نمی‌شود.

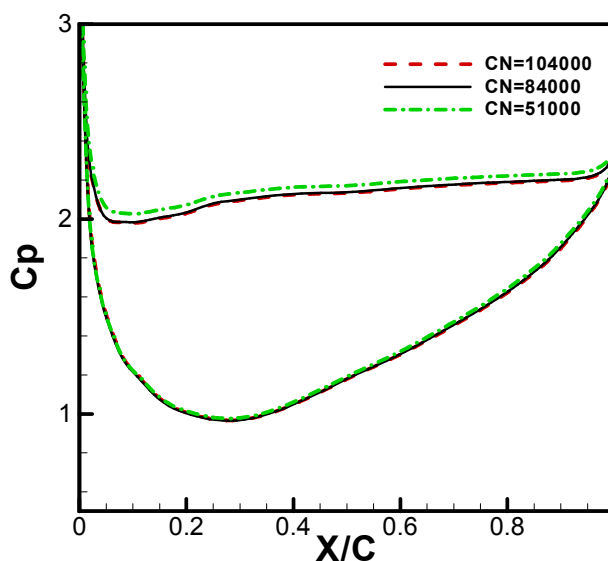
در شبیه‌سازی‌های عددی لازم است درستی حل عددی نشان داده شود. برای این منظور، نتایج ضریب برا حول NACA 4412 با زاویه حمله ۵ درجه و $h/c=1$ به‌ازای چند عدد فرود مختلف در شکل ۵- الف نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵- ب توزیع فشار حول هیدروفویل در شرایط $Fc=1$ ، $AOA=5^\circ$ ، $h/c=1$ با نتایج تجربی (Kouh et al., 2002) مقایسه شده است.

مقایسه نتایج تجربی (Kouh et al., 2002) و عددی در این شکل، تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در شکل ۶ مقدار خطای نرمالیزه شده بر حسب تکرار نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در این تحقیق شبیه‌سازی حرکت هیدروفویل در نزدیکی سطح مد نظر بوده، لذا عدد فرود اهمیت بیشتری در مقایسه با عدد رینولدز دارد و به همین دلیل عدد بدون بعد فرود مبنای شبیه‌سازی بوده است. اما اگر عمق غوطه‌وری طوری افزایش یابد که تأثیر سطح آزاد از بین برود، در این صورت عدد رینولدز اهمیت بیشتری می‌یابد. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که به دلیل استفاده از هیدروفویل‌های استاندارد در این تحقیق و این که در این هیدروفویل‌ها همه پارامترها از جمله ضخامت و خمیدگی با طول وتر هیدروفویل، بی‌بعد می‌شوند، لذا طول وتر هیدروفویل به‌عنوان پارامتر معنادار بوده و مبنایی برای بی‌بعدسازی قرار گرفته است. از سوی دیگر، در بیشتر مقالات، ضریب عمق غوطه‌وری بی‌بعد شده بر حسب طول وتر هیدروفویل (h/c) به‌عنوان پارامتر، بررسی شده است، بنابراین به‌منظور اعتبارسنجی در این تحقیق، بی‌بعدسازی فاصله، با این پارامتر انجام شده است (Kouh, 2002; Xie et al., 2007).

۳-۲- نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی عددی لازم است استقلال از شبکه بررسی



شکل ۴ نمودار توزیع ضریب فشار حول هیدروفویل NACA4412 به ازای شبکه‌های مختلف

خطا از روابط زیر به دست آمده است:

$$R = \sum_{i=1}^m \left[(a_p - S_p) \phi_p - \sum_{n=1}^k a_{nb} \phi_{nb} - S_u \right]_i, \phi$$

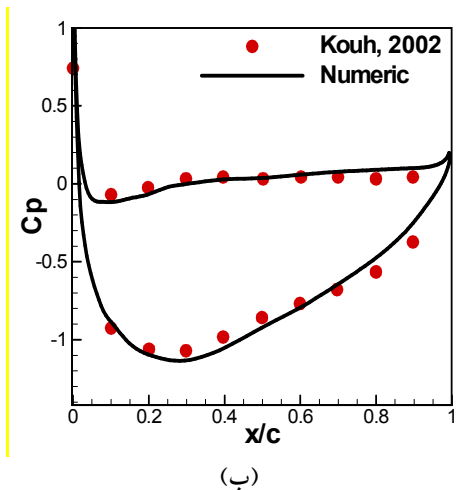
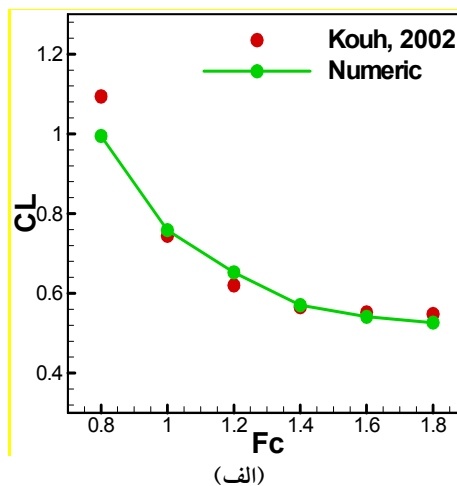
$$= F_{inlet} \phi_{inlet}$$

$$\left| \frac{R}{\phi} \right| < \lambda, \quad \lambda \approx 10^{-3} \quad (16)$$

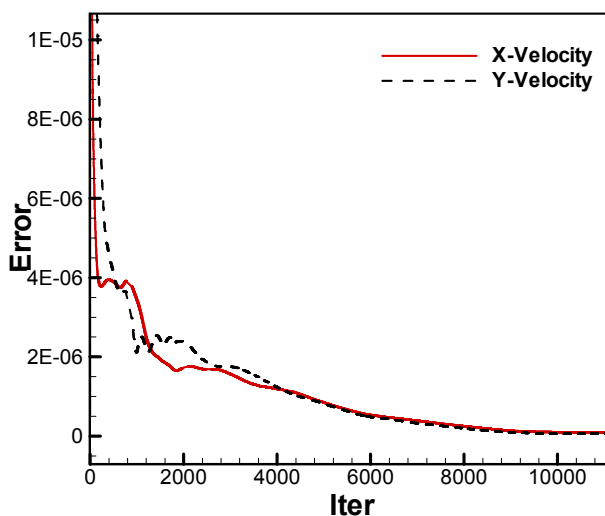
اکنون با اطمینان یافتن از درستی حل عددی می‌توان به بررسی پارامترهای مورد نظر پرداخت. شکل ۷ نمودار توزیع ضریب فشار را روی سطح چند هیدروفویل نشان می‌دهد. در آغاز اثر ضخامت هیدروفویل بررسی شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش ضخامت هیدروفویل فشار در سطح بالا و پایین آن کاهش می‌یابد، اما کاهش فشار در سطح بالا بیشتر بوده و به همین دلیل نیروی برای افزایش یافته است. ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد با افزایش ضخامت، نیروی پسا زیاد می‌شود، اما نسبت نیروی برا به پسا کاهش می‌یابد.

جدول ۱ بررسی اثر ضخامت هیدروفویل بر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا

h/c=0.7, AOA=5, Fc=1	CL	CD	CL/CD
NACA0009	۰/۳۶۸	۰/۰۶۵۲	۵/۶۵۶
NACA 0012	۰/۳۷۶	۰/۰۷۸۳	۴/۸۱۳
NACA 0015	۰/۳۷۸	۰/۰۹۳۱	۴/۰۶۰



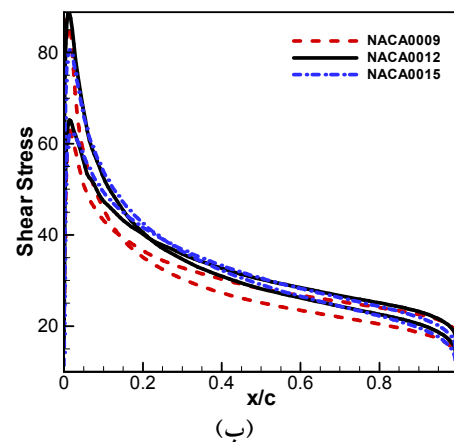
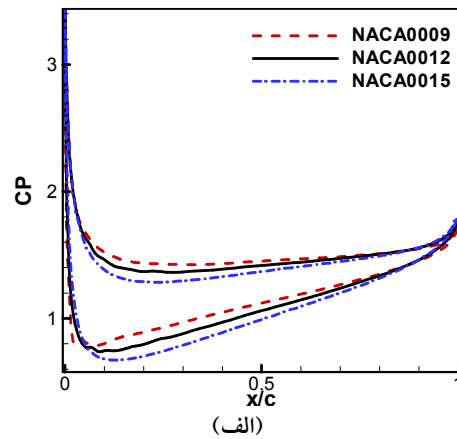
شکل ۵ مقایسه حل عددی حاضر با نتایج تجربی (Kouh, 2002)



شکل ۶ نمودار خطای نرمال شده بر حسب تکرار حل عددی

بر روی سطح هیدروفویل بیشتر باشد امواج منتشر شده قوی‌تر بوده و سبب تغییر شکل بیشتر در سطح می‌شوند. به همین علت با افزایش ضخامت هیدروفویل موج ایجاد شده در سطح آب قوی‌تر می‌شود. شکل ۹ تأثیر ضخامت هیدروفویل بر پروفیل سرعت پشت آن را نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت هیدروفویل گردابه‌های ایجاد شده در پشت آن قوی‌تر شده و این، به افزایش نیروی پسا به‌زای ضخامت بیشتر هیدروفویل منجر می‌شود. نکته جالب آن است که نوع هیدروفویل غوطه‌ور در زیر آب بر جریان هوای آزاد نیز تأثیر می‌گذارد و پروفیل لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطح آب تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. به‌طوری که با افزایش ضخامت هیدروفویل، گرادیان سرعت در لایه مرزی کمتر و تنش برشی بر روی سطح کمتر می‌شود. بنابراین موج ایجاد شده بر روی سطح آب با افزایش ضخامت قوی‌تر می‌شود.

شکل ۱۰ نمودار توزیع فشار بر روی سطوح هیدروفویل را برای انحنای مختلف نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش انحنای فشار در سطح بالا کاهش و در سطح پایین افزایش و در نتیجه نیروی برآ افزایش می‌یابد. نیروی پسا نیز با افزایش انحنای روندی افزایشی دارد، اما مقدار افزایش در نیروی برآ بیشتر بوده و این موجب می‌شود که روند تغییر نسبت برآ به پسا افزایش یابد. وقتی انحنای هیدروفویل زیاد می‌شود، سرعت در سطح بالا افزایش یافته و موجب کاهش فشار در آن ناحیه می‌شود. از طرفی با افزایش انحنای سیال عبوری از سطح زیرین با مانع بزرگتری در تماس است که این موجب افزایش فشار و نیروی پسا خواهد شد. شکل ۱۱ پروفیل موج‌دار سطح آزاد را نشان می‌دهد.

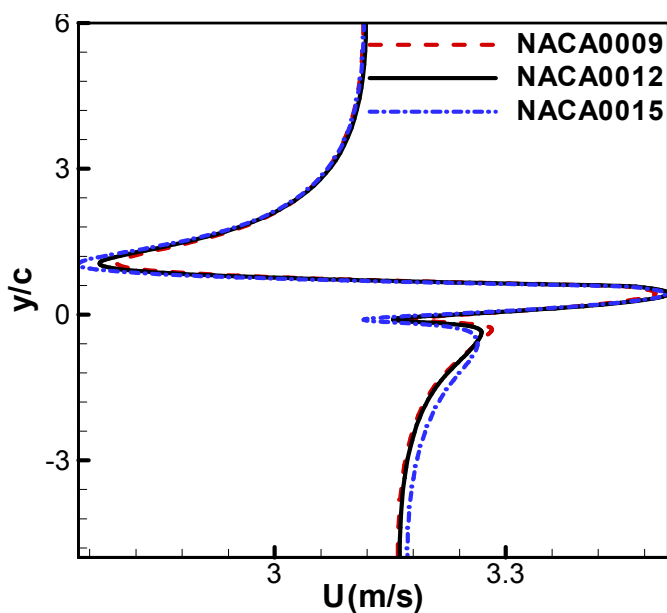


شکل ۷ مقایسه هیدروفویل‌های NACA0009,0012,0015 به‌ازای $h/c=0.7, AOA=5^\circ, Fc=1$

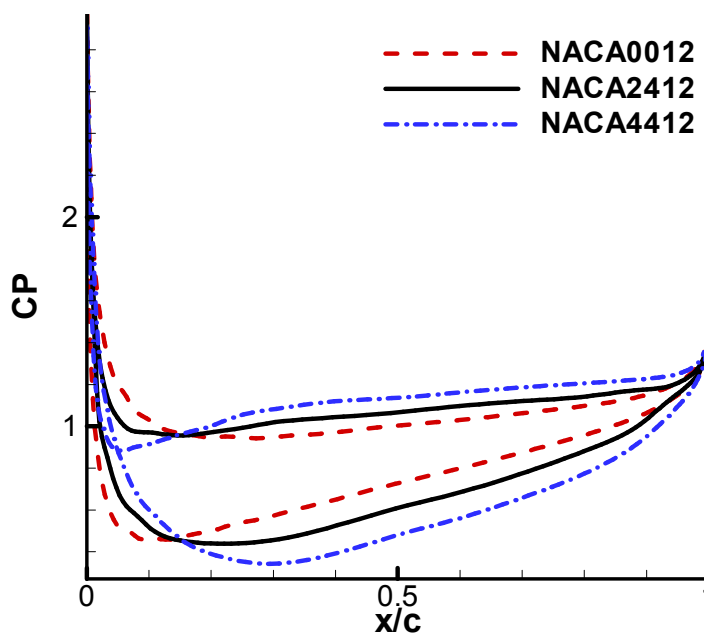
همین رفتار بین هیدروفویل‌های با انحنای متفاوت نیز دیده می‌شود. شکل ۸ پروفیل سطح آزاد را برای دو هیدروفویل نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که هر چه ضخامت هیدروفویل بیشتر باشد، دامنه موج ایجاد شده بزرگتر می‌شود، زیرا با افزایش ضخامت، فشار در سطح بالایی هیدروفویل کاهش بیشتری یافته و تغییر فشار در این سطح بیشتر خواهد شد. این تغییر فشار سبب انتشار امواجی در داخل آب می‌شود که به سطح آب رسیده و سبب تغییر شکل سطح آب می‌شود. هر چه گرادیان فشار



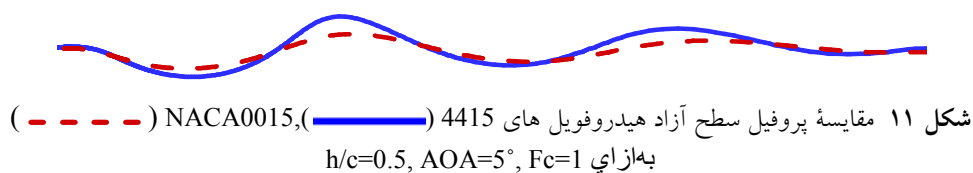
شکل ۸ مقایسه پروفیل سطح آزاد برای NACA0015 (—) ، NACA0012 (---) به‌ازای $h/c=0.7, AOA=5^\circ, Fc=1$



شکل ۹ پروفیل سرعت در فاصله $x=2c$ در پشت هیدروفویل به‌ازای $h/c=0.7, AOA=5^\circ, Fc=1$



شکل ۱۰ مقایسه هیدروفویل‌های NACA0012, 2412, 4412 به‌ازای $h/c=0.5, AOA=5^\circ, Fc=1$



شکل ۱۱ مقایسه پروفیل سطح آزاد هیدروفویل‌های 4415, (NACA0015) (---) به‌ازای $h/c=0.5, AOA=5^\circ, Fc=1$

همچنین با افزایش انحنای هیدروفویل گرادیان سرعت در پروفیل لایه مرزی زیر سطح آب روندی کاهشی دارد و در نتیجه، تنش برشی آب نیز کاهش می‌یابد. به همین دلیل با افزایش انحنای هیدروفویل، امواج سطح آزاد دامنه بزرگتری دارد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ لزجت آشفتگی حول هیدروفویل‌های 0012 و 4412 را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر نشان داده شده، با افزایش انحنای هیدروفویل امواج سطحی قوی‌تری تشکیل می‌شوند. این شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که با افزایش انحنای، لزجت آشفتگی حول هیدروفویل بیشتر شده است. جدول ۳ نشان دهنده درصد تغییر ضرایب هیدرودینامیکی بر اثر انحنای است. نکته قابل توجه آن است که با افزایش انحنای، به‌ازای ضخامت کمتر، نسبت برا به پسا رشد بیشتری دارد، هر چند ضریب برا و پسا تغییر کمتری دارد.

جدول ۳ درصد تغییر ضرایب برا، پسا و نسبت آنها

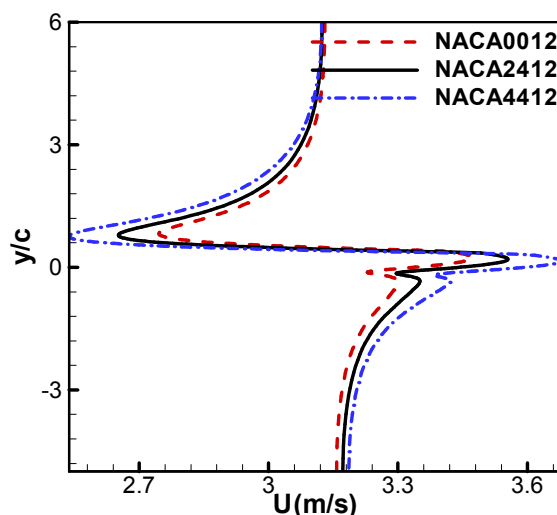
$h/c=1, Fc=1, AOA=5^\circ$	CL%	CD%	CL/CD%
NACA 0012-4412	۵۸/۶۸	۲۸	۲۳/۹
NACA 0015-4415	۵۹/۸۸	۳۱	۲۱/۹۶

مقادیر ضرایب برا، پسا و نسبت برا به پسا به‌ازای انحنای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ بررسی اثر انحنای هیدروفویل بر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا

$h/c=0.5, AOA=5, Fc=1$	CL	CD	CL/CD
NACA0012	۰/۲۹۴	۰/۰۲۷۲	۴/۰۴۶
NACA 2412	۰/۳۷۴	۰/۰۸۰۷	۴/۶۳۰
NACA 4412	۰/۴۷۲	۰/۰۹۹۲	۴/۷۵۸

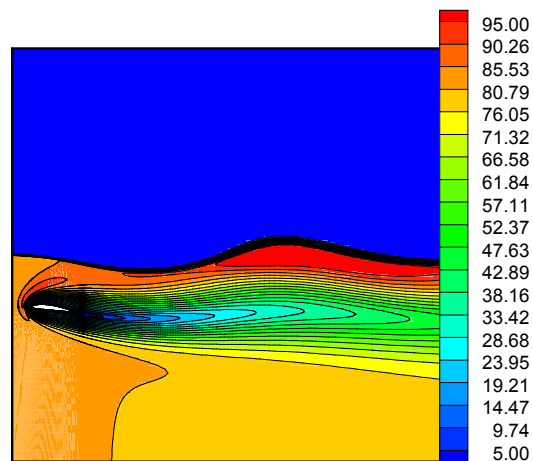
مشاهده می‌شود که با افزایش انحنای، دامنه موج بزرگتر می‌شود. شکل ۱۲ تأثیر انحنای هیدروفویل بر پروفیل سرعت در پشت آن را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش انحنای هیدروفویل، تغییر سرعت در پشت هیدروفویل بیشتر شده، به‌طوری که دنباله قوی‌تری در پشت هیدروفویل ایجاد شده و به افزایش نیروی پسا در اثر افزایش انحنای هیدروفویل منجر می‌شود. نکته جالب آن است که با افزایش انحنای هیدروفویل نیز پروفیل لایه مرزی هوا تشکیل شده بر روی سطح آب تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به‌طوری که با افزایش انحنای هیدروفویل، گرادیان سرعت در پروفیل لایه مرزی کاهش می‌یابد.



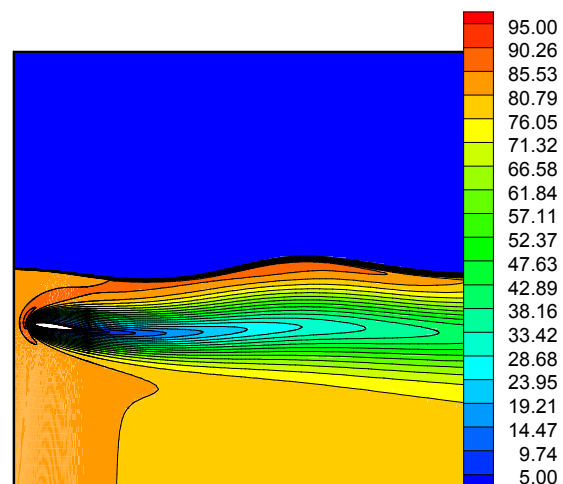
شکل ۱۲ تأثیر انحنای هیدروفویل بر پروفیل سرعت در پشت آن در $x/c=2$ به‌ازای $h/c=0.5, AOA=5^\circ, Fc=1$

در این تحقیق اثر عمق فرورفتگی هیدروفویل به‌ازای $h/c=0.5, 0.7, 1$ بررسی شده است. علت این که عمق نسبی بین نصف کورد تا ۱ کورد ($h/c=0.5-1$) انتخاب شده، آن است که در این فاصله، اثر حرکت هیدروفویل و تشکیل موج بر روی سطح آزاد آب بیشتر بوده و امواج تشکیل شده در این فاصله را بهتر می‌توان مطالعه کرد. البته هر چه عمق بیشتر شود اثر سطح کمتر می‌شود، به طوری که به‌ازای عمق غوطه‌وری بیشتر از $h/c=4$ ، اثر سطح دیگر معنا ندارد و امواجی بر روی سطح آب تشکیل نمی‌شود و در نتیجه شرایط مدل‌سازی متفاوت خواهد بود. در شکل ۱۵ موج ایجاد شده بر روی سطح آزاد آب به‌ازای $h/c=0.5, 4$ مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل می‌توان دریافت به‌ازای عمق $h/c=4$ اثر سطح دیگر معنا ندارد و حرکت هیدروفویل باعث ایجاد موجی در سطح آزاد نمی‌شود. لذا محدوده اثر عدد فرود را می‌توان تا عمق غوطه‌وری $h/c=4$ در نظر گرفت، برای عمق‌های بیشتر، اثر عدد رینولدز غالب است.

شکل ۱۶ منحنی توزیع فشار بر روی سطوح هیدروفویل NACA 0015 را به‌ازای عمق‌های مختلف فرورفتگی نشان می‌دهد. هر چه عمق فرورفتگی هیدروفویل بیشتر باشد، فشار بر روی سطوح بیشتر افزایش می‌یابد. با افزایش عمق فرورفتگی، اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین هیدروفویل نیز بیشتر می‌شود. جدول ۴ ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا را نشان می‌دهد.



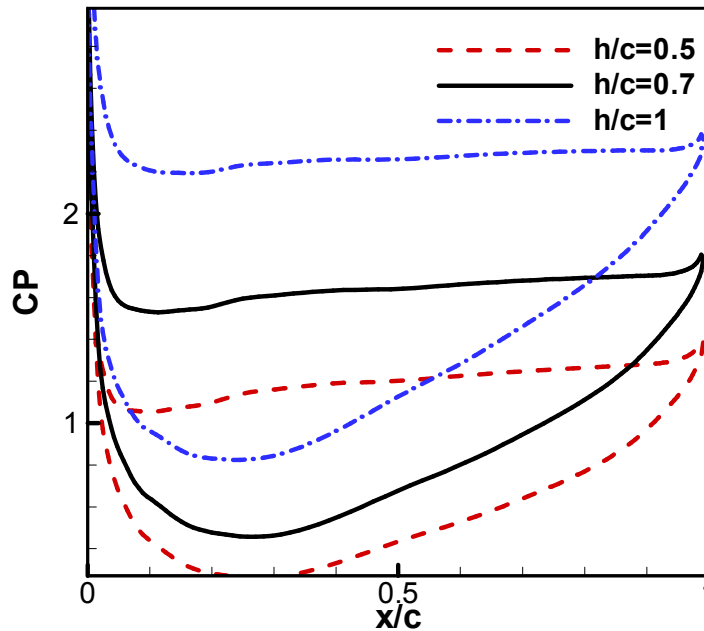
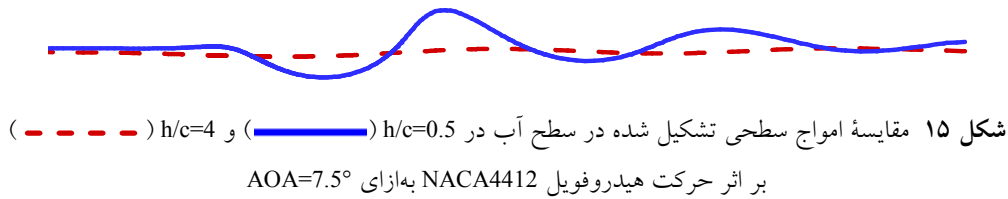
شکل ۱۳ لزجت آشفتگی حول هیدروفویل NACA4412 در $h/c=1, AOA=7.5$



شکل ۱۴ لزجت آشفتگی حول هیدروفویل NACA0012 در $h/c=1, AOA=7.5$

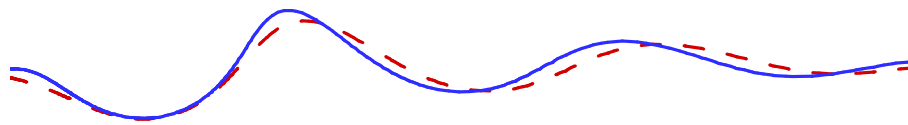
جدول ۴ بررسی اثر عمق فرورفتگی هیدروفویل بر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا

AOA=7.5°, Fc=1	h/c	CL	CD	CL/CD
NACA 0012	۰/۵	۰/۴۷۳۵۱۱	۰/۰۹۴۱۹	۰/۴۲۱۳۶
	۰/۷	۵/۱۲۰۲۲۹	۰/۱۰۴۸	۰/۵۳۶۶
	۱	۵/۸۹۵۶۶۸	۰/۱۱۳۱	۰/۶۶۶۸
NACA 4412	۰/۵	۴/۸۶۹۱۹۳	۰/۱۲۶۱۴	۰/۶۱۴۲
	۰/۷	۵/۵۶۵۸۱۳	۰/۱۴۲۹۸	۰/۷۹۵۸
	۱	۶/۵۲۰۹۱	۰/۱۵۰۴۱	۰/۹۸۰۸۱



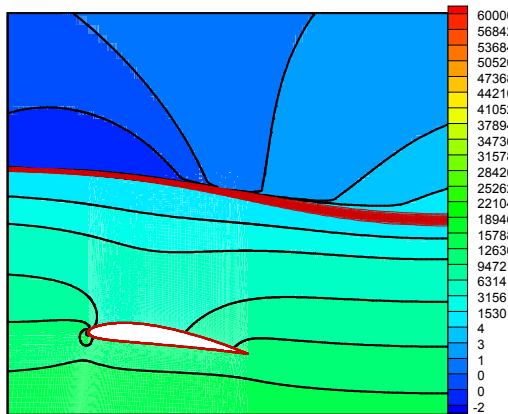
اما هر چه عمق غوطه‌وری افزایش یابد، استهلاک بیشتر این امواج در رسیدن به سطح آزاد مایع افزایش یافته و در نتیجه موج تشکیل شده در سطح آزاد ضعیف‌تر خواهد بود (شکل ۱۷). همان‌طور که پیشتر بیان شد با افزایش عمق غوطه‌وری گرادیان فشار در سطح فوقانی هیدروفویل بیشتر می‌شود و امواج منتشر شده بر اثر این تغییرات قدرت بیشتری دارند؛ اما چون عمق غوطه‌وری بیشتر است، بخش بزرگی از قدرت امواج مستهلک می‌شود و هنگامی که این امواج به سطح آزاد می‌رسند، قدرت کمتری دارند. اما هنگامی که هیدروفویل در نزدیکی سطح آزاد قرار می‌گیرد انرژی کمتری در آب مستهلک شده و این امواج با قدرت بیشتری به سطح آزاد می‌رسند.

همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد با افزایش عمق غوطه‌وری ضرایب برا و پسا افزایش می‌یابند. همچنین نسبت برا به پسا روندی رو به رشد دارد. توزیع ضریب فشار بر روی هیدروفویل برای مقادیر مختلف h/c در شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با افزایش عمق غوطه‌وری فشار در سطح بالایی هیدروفویل تغییرات زیادی دارد. به بیان دیگر هر چه عمق غوطه‌وری افزایش یابد، شیب تغییر ضریب فشار بیشتر می‌شود. علت این امر را می‌توان اثر سطح آزاد دانست. بر اثر این تغییر فشار، امواجی در داخل آب منتشر می‌شود. قدرت این امواج به تغییر فشار در سطح هیدروفویل بستگی دارد و هر چه تغییر فشار در سطح هیدروفویل بیشتر باشد، امواج قوی‌تری از سطح آب به سطح آزاد سیال منتشر می‌شود،

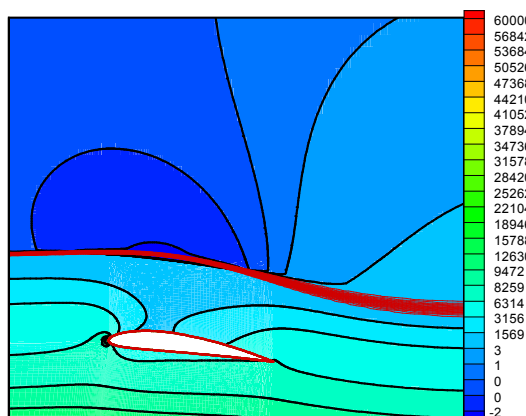


شکل ۱۷ مقایسه پروفیل موج سطح آزاد هیدروفویل NACA4412 در $AOA=7.5^\circ$ به ازای $h/c=0.5$ (—) ، $h/c=1$ (- - -)

بر روی سطح آزاد منجر می‌شود. بنابراین هر چه هیدروفویل به سطح آزاد نزدیک‌تر شود، تنش برشی بر روی سطح آزاد کاهش یافته و این موجب شکست امواج می‌شود. در شکل ۲۱ تأثیر زاویه حمله بررسی شده است.



شکل ۱۸ منحنی‌های هم‌تراز فشار استاتیکی حول هیدروفویل NACA4412 در $h/c=1$, $AOA=7.5^\circ$, $Fc=1$



شکل ۱۹ منحنی‌های هم‌تراز فشار استاتیکی حول هیدروفویل NACA4412 در $h/c=0.5$, $AOA=7.5^\circ$, $Fc=1$

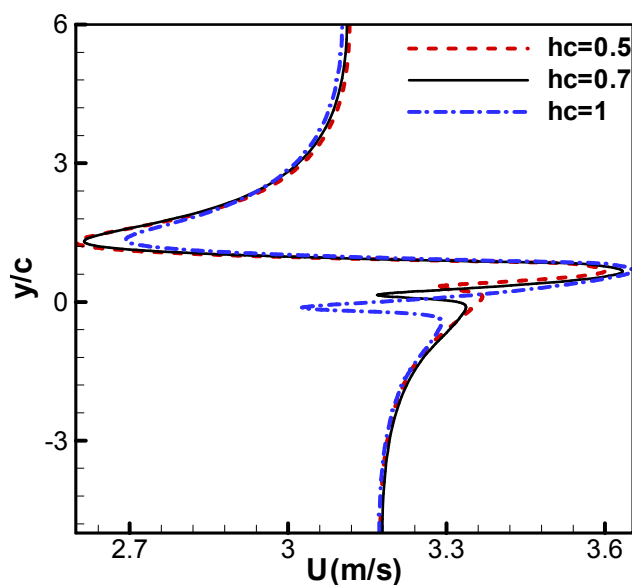
به همین دلیل هر چه عمق غوطه‌وری کمتر باشد موج تشکیل شده در سطح آزاد تغییر بیشتری دارد. از آنجا که به‌ازای عمق غوطه‌وری کمتر موج ایجاد شده در سطح آزاد قوس بیشتری دارد، سیال زیرین بیشتر محبوس می‌شود و فشار افزایش می‌یابد. این افزایش فشار بر فشار روی سطح فوقانی هیدروفویل تأثیر می‌گذارد و سبب افزایش فشار در آن می‌شود. اما هر چه عمق غوطه‌وری بیشتر شود موج ایجاد شده در سطح آزاد قوس کمتری داشته و حبس سیال کمتر بوده و فشار افزایش کمتری دارد. به همین دلیل با افزایش عمق غوطه‌وری نیروی برا افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب، توزیع فشار استاتیکی حول هیدروفویل NACA4412 را در $h/c=1$ و $h/c=0.5$ نشان می‌دهد. در این شکل‌ها به‌خوبی می‌توان روند تغییر فشار را ملاحظه کرد.

در شکل ۲۰ پروفیل سرعت در پشت هیدروفویل به‌ازای عمق‌های مختلف غوطه‌وری نشان داده شده است. با افزایش عمق غوطه‌وری دنباله ایجاد شده در پشت هیدروفویل قوی‌تر شده و در نتیجه نیروی پسا با افزایش عمق غوطه‌وری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش عمق غوطه‌وری فاصله هیدروفویل از سطح آزاد افزایش یافته و حرکت هیدروفویل تأثیر کمتری بر جریان سطح آزاد می‌گذارد. به همین دلیل پروفیل لایه مرزی هوا در سطح آزاد با افزایش عمق غوطه‌وری هیدروفویل رشد کمتری دارد. از سوی دیگر هرچه هیدروفویل به سطح آزاد نزدیک‌تر می‌شود، $\partial u/\partial y$ در لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطح آزاد کمتر شده و این به کاهش تنش برشی

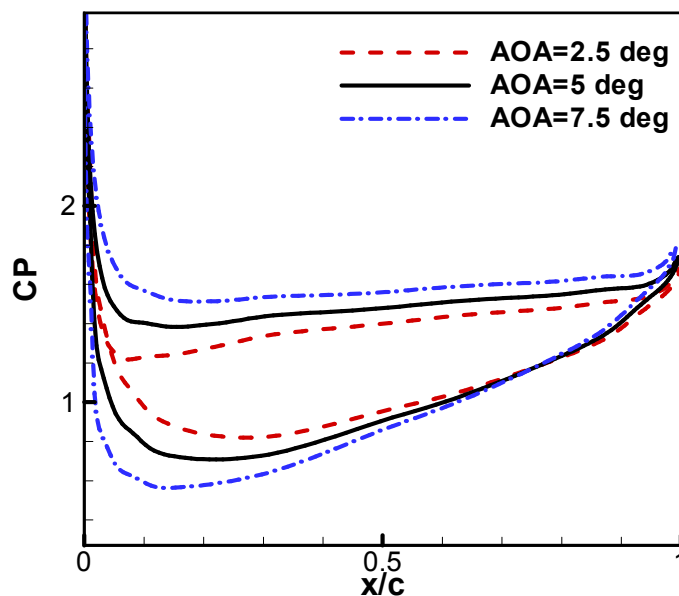
جدول ۵ تأثیر تغییر زاویه حمله بر ضرایب هیدرودینامیکی
هیدروفویل NACA2412 در $h/c=0.7, Fc=1$

AOA	CL	CD	CL/CD
۲/۵	۴/۴۸۶۷۸۴	۰/۰۶۹۹۹	۰/۳۱۴۰۳
۵	۵/۴۶۳۵۴۲	۰/۰۸۷۹۱	۰/۴۸۰۳
۷/۵	۵/۵۲۴۳۱۴	۰/۱۱۷۰۱	۰/۶۴۶۴

این شکل نشان می‌دهد که با افزایش زاویه حمله، فشار در سطح بالای هیدروفویل کاهش و در سطح پایین آن افزایش می‌یابد که در نتیجه سبب افزایش برا و پسا می‌شود. ضرایب هیدرودینامیکی و نسبت برا به پسا در جدول ۵ آورده شده است. شکل ۲۲ توزیع فشار و جدول ۶ ضرایب هیدرودینامیکی بر هیدروفویل NACA4412 را به‌ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ تأثیر عمق غوطه‌وری بر پروفیل سرعت در پشت هیدروفویل NACA4412 به‌ازای $h/c=2, AOA=7.5, Fc=1$



شکل ۲۱ مقایسه اثر زاویه حمله هیدروفویل NACA2412 به‌ازای $h/c=0.7, Fc=1$

برای به پسا روندی کاهش می‌دهد که با افزایش سرعت، فشار کاهش می‌یابد. اما کاهش فشار در سطح پایین، افت بیشتری داشته و موجب کاهش ضرایب برای می‌شود. همچنین ضریب پسا نیز روندی نزولی داشته و در مجموع نسبت برای به پسا کاهش خواهد بود (جدول ۶).

این شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، فشار کاهش می‌یابد. اما کاهش فشار در سطح پایین، افت بیشتری داشته و موجب کاهش ضرایب برای می‌شود. همچنین ضریب پسا نیز روندی نزولی داشته و در مجموع نسبت برای به پسا کاهش خواهد بود (جدول ۶).

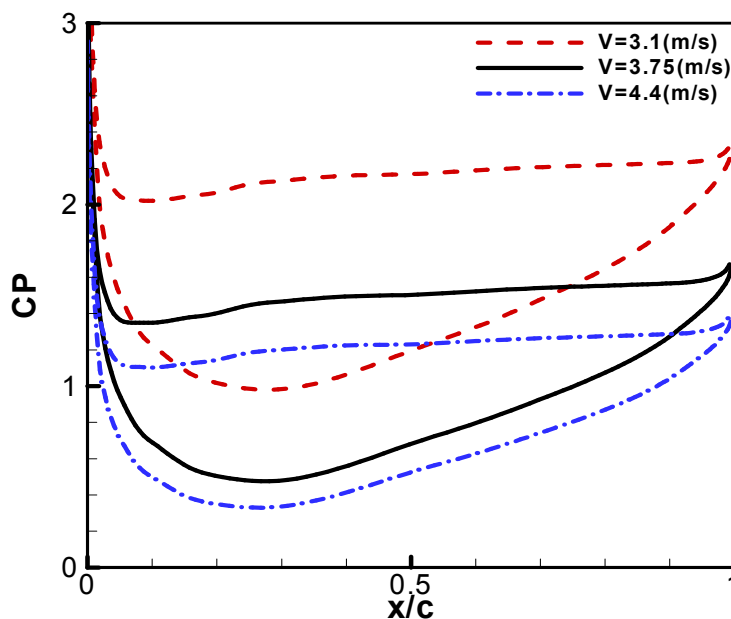
برای به پسا کاهش خواهد بود (جدول ۶).

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر ضخامت و انحناهای هیدروفویل و اثر عمق فرورفتگی آن در آب و نیز تأثیر سرعت مطالعه شده است. نکته قابل توجه آن است که با افزایش ضخامت هیدروفویل، ضرایب برای و پسا بزرگتر می‌شوند، اما نسبت

جدول ۶ بررسی اثر سرعت بر ضرایب برای و پسا و نسبت برای به پسا

h/c=1, AOA=5°	Velocity (m/s)	CL	CD	CL/CD
NACA 4412	۱/۲۵	۱/۸۷۵	۰/۱۴۶۵	۱۲/۷۹۸۶۳
	۲/۲	۱/۱۵۳۸	۰/۱۳۳۰۵	۸/۶۷۱۹۲۸
	۳/۱	۰/۷۵۸۵	۰/۱۱۳۳۴	۶/۶۹۲۲۵۳
	۳/۷۵	۰/۶۵۲۷	۰/۰۹۹۸۲	۶/۵۳۸۷۷
	۴/۴	۰/۵۷۰۸	۰/۰۸۶۳	۶/۶۱۴۱۳۷
	۵	۰/۵۴۱۲	۰/۰۹۱۰۲	۵/۹۴۵۹۴۶



شکل ۲۲ مقایسه اثر سرعت جریان حول هیدروفویل NACA4412 به‌ازای h/c=1, AOA=5°

۵- فهرست علائم

A	سطح سلول
AOA	زاویه حمله
c	طول وتر
C_1	ضریب ثابت مدل
C_2	ضریب ثابت مدل
CD	ضریب پسا
CL	ضریب برا
D	نیروی پسا
F	شار
F_c	عدد فرود
G	تولید انرژی جنبشی اغتشاش
h	عمق فروروی
I^D	شار نفوذ
I^c	شار جابه‌جایی
k	انرژی جنبشی آشفتگی
L	نیروی برا
\dot{m}	دبی جرمی
P	فاز اول
p	فشار
q	فاز دوم
\vec{q}	بردار شار اسکالر
Re	عدد رینولدز
\vec{S}	جمله چشمه
\vec{T}	تانسور تنش
x	مختصات افقی
y	مختصات عمودی
u	بردار سرعت
Γ	ضریب پخش
Γ_ϕ^t	ترم پخش توربولان
α	درصد حجمی
δv	حجم سلول
ε	نرخ استهلاك آشفتگی
θ	زاویه (درجه)
μ	لزجت
μ	لزجت توربولانسی

۶- تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه طرح پژوهشی به شماره ۲۶۴ مصوب تاریخ ۹۰/۳/۱۰ در دانشکده مهندسی دانشکاه فردوسی مشهد می‌باشد و با حمایت مالی آن سازمان انجام شده است.

۷- منابع

علی اسماعیلی، "شبیه سازی جریان لزج آشفته در اطراف یک بالواره هوشمند و بررسی اثر آن بر ضرایب آیرودینامیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۰.

Abbott H. and Doenhoff E. (1959). "Theory of wing sections", Dover Publications by Newyourk.

Bai K. J. and Han J. H. (1994). "A localized finite element method for the non-linear steady waves due to a two-dimensional hydrofoil", Journal of Ship Research, Vol. 38, pp.42-51.

Blasi P. D., Romano G. P., Felice F. D. and Lalli F. (2000). "Experimental study of breaking wave flow field past a submerged hydrofoil by LDV", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 263-269.

Bourgoyne Dwayne A. (2003). "Flow over a hydrofoil with trailing edge vortex shedding at high Reynolds number", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Michigan.

Carcatteraa A., Dessi D. and Mastroddi F. (2005). "Hydrofoil vibration induced by a random flow: A stochastic perturbation approach", Journal of Sound and Vibration, Vol. 283, pp. 401-432.

Chen C. K. and Liu H. (2005). "A submerged vortex lattice method for calculation of the flow around three-dimensional hydrofoil", Journal of Ship Mechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 156-163.

Daskovsky M. (2000) "The hydrofoil in surface proximity, theory and experiment", Ocean Engineering, Vol. 27, pp.1129-1159.

Djavareshkian M. and Esmaeili A. (2012). "Application of smart flap for race car wings",

- Liu H. and Ikehata M. (1994). "Computation of free surface waves around an arbitrary body by a Navier-Stokes solver using the pseudocompressibility technique", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 19, pp. 395-413.
- Munch C., Ausoni P., Braun O., Farhat M. and Avellan F. (2010). "Fluid-structure coupling for an oscillating hydrofoil", *Journal of Fluid and Structure*, Vol. 26, pp. 1018-1033.
- Parkin B. R., Perry B. and Wu T. Y. (1956). "Pressure distribution on a hydrofoil running near the water surface", *Journal of Applied Physics*, Vol. 27, pp. 232-240.
- Rhee S. H., Kim S. E., Ahn H., Oh J. and Kim H. (2003). "Analysis of a jet-controlled high-lift hydrofoil with a flap", *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 2117-2136.
- Xie N. and Vassalos D. (2007). "Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface", *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1257-1264.
- Sadathosseini S. H., Mousaviraad S. M., Firoozabadi B. and Ahmadi G. (2008). "Numerical simulation of free-surface waves and wave induced separation", *Journal of Scientia Iranica, Sharif University of Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 323-331.
- Zanette J., Imbault D. and Tourabi A. (2010). "A design methodology for cross flow water turbines", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 997-1009.
- International Journal of Aerodynamics, Vol. 2, pp.66-92.
- Ducoin A., Jacques A., Astolfi A., François D. and François S. J. (2009). "Computational and experimental investigation of flow over a transient pitching hydrofoil", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, pp. 728-743.
- Filippov S. I. (2001). "Flow past a submerged hydrofoil", *Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 36, No. 3, pp. 489-496.
- Guidoni A. (1928). "Seaplanes - Fifteen years of national aviation", *Journal R.A.S.*, Vol. 32, No. 205, pp. 25-64.
- Hay A. and Visonneau M. (2005). "Computation of free-surface flows with local mesh adaptation", *International Journal for Numerical Methods in fluids*, Vol. 49, pp. 785-816.
- Javarehshkian M., Esmaili A. and Parsani A. (2011). "Aerodynamics of smart flap under ground effect", *J. of Aerospace Science and Technology*, Vol. 15, pp. 642-652.
- Kim S. H. and Yamato H. (2005). "The estimation of wave elevation and wave disturbance caused by the wave orbital motion of a fully submerged hydrofoil craft", *Journal of Marine Science Technology*, Vol. 10, pp. 22-31.
- Kouh J. S., Lin T. J. and Chau S. W. (2002). "Performance analysis of two-dimensional hydrofoil under free surface", *Journal of National Taiwan University*, Vol. 86, pp. 113-123.