

شبیه سازی هیدروفویل کاملاً غوطه ور در آب و بررسی عملکرد هیدرودینامیکی

محمدحسن جوارشکیان^۱، علی اسماعیلی^۲، عبدالمجید زمانی^۳

^۱دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Javareshkian@ferdowsi.um.ac.ir

^۲دانشجو، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Aliasmaeli30316@yahoo.com

^۳دانشجو، دانشگاه فردوسی مشهد؛ msc.zamani@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، تاثیر ضخامت و انحنا بر شکل موج، عمق فرورفتگی و تاثیر عدد فرود برای یک هیدروفویل غوطه ور در آب با یک روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. روش عددی استفاده شده بر اساس الگوریتم فشار مینا بوده و از تکنیک SIMPLE برای حل معادلات ناویراستوکس، و از ایده VOF برای شبیه سازی دو فاز آب و هوا بهره گرفته شده است. از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ و اسکیم مرتبه دوم بالادست برای طرح های تفاضلی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش ضخامت هیدروفویل ضرایب برا و پسا بیشتر می شوند، ولی نسبت برا به پسا روند کاهشی دارد. از طرفی با افزایش انحنا، هر چند که ضریب برا و پسا افزایش می یابد، اما نسبت برا به پسا نیز روند صعودی دارد. لذا در انتخاب مقطع مناسب برای هیدروفویل ها، هر چه ضخامت کمتر و انحنا بیشتر باشد، عملکرد هیدرودینامیکی آن مطلوبتر است. همچنین با افزایش عمق، ضریب برا و پسا روند رو به رشدی دارند که منجر به افزایش نسبت برا به پسا می شود. با افزایش عدد فرود، ضرایب برا و پسا کاهش می یابد و در مجموع نسبت برا به پسا نیز کم می شود. برای نشان دادن صحت روند حل عددی، قسمتی از نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی منتشر شده مقایسه، که تطابق خوبی را نشان داده و روند شبیه سازی را تایید می نماید.

واژه های کلیدی: هیدروفویل، موج، برا، پسا، عملکرد هیدرودینامیکی

۱- مقدمه

افزایش نیاز به استفاده از سیستم های دریایی، محققین را به سمت مطالعه و طراحی آنها سوق می دهد. شناورهای تندرو به عنوان یکی از مهمترین این سیستم ها می باشد. یکی از مهمترین روشهای افزایش سرعت شناورها استفاده از هیدروفویل است. شناورهای هیدروفویلی گونه ای شناخته شده از شناورهای تندرو هستند که علاوه بر قابلیت حرکت با سرعت بالا، قدرت مانور دهی زیاد، پایداری خوب و عملکرد مناسبی در امواج دارند. در این صورت تحلیل عملکرد هیدروفویل ها مورد اهمیت قرار می گیرد. وقتی عمق فرورفتگی هیدروفویل کم شود اثر سطح آزاد دارای اهمیت شده و باید در محاسبات منظور گردد. تاریخچه استفاده از هیدروفویل ها به سال ۱۸۹۸ بر می گردد. در آن سال فورلانی^۱ در ایتالیا تلاش کرد که برای افزایش سرعت قایق از هیدروفویل ها استفاده کند. در سال ۱۹۱۱ گویدونی^۲ نیز هیدروفویل را در وسایل پرنده دریایی جایگزین کرد[۱]. معادلات حاکم بر جریان حول هیدروفویل ها در آن سال ها شناخته شده بود اما پیچیدگی هندسه و نیز ویژگی های جریان سبب شد که این معادلات به سادگی قابل حل نباشند. لذا از مدل های تئوری برای شناخت بیشتر مسئله استفاده کردند. به طوری که جریان پتانسیل و نیز روش تصویری توسط ولادمیروف^۳(۱۹۳۷)، کوتچین^۴(۱۹۵۱) و دیگران توسعه داده شد. پارکین^۵ و همکاران یک مقطع متقارن جوکوفسکی که دارای ضخامت ۱۲٪ بود مورد بررسی قرار دادند و برای سادگی حل از روش پتانسیل استفاده کردند[۲]. در سال ۱۹۹۴، بای و هن^۶ با روش المان محدود جریان حول یک هیدروفویل دو بعدی تحت شرایط خطی و غیر خطی سطح آزاد را حل کرد[۳]. بلاسی^۷ و همکاران (۲۰۰۰) به مطالعه تجربی بر روی شکست امواج پشت هیدروفویل های غرق شده پرداختند[۴]. داسکوفسکی^۸ نیز اثرات نزدیکی سطح بر روی نیروی برآ تولیدی توسط هیدروفویل را به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار داد[۵]. در سال ۲۰۰۱ فلیپو^۹ نیز جریان پایا عبوری از یک هیدروفویل را به صورت تحلیلی و با استفاده از روش اغتشاشات^{۱۰} حل کرد[۶]. کیو^{۱۱} و همکاران نیز در سال ۲۰۰۲ به تحلیل عملکرد یک هیدروفویل دو بعدی تحت سطح آزاد پرداختند[۷]. در سال ۲۰۰۳، ریهی^{۱۲} و همکاران به آنالیز یک هیدروفویل که دارای بالچه می باشد متمرکز شدند[۸]. در همین سال بوروگیان^{۱۳} در طی یک کار آزمایشگاهی جریان دو بعدی حول یک هیدروفویل را تست کرد[۹]. در سال ۲۰۰۵ نیز جین و لیو^{۱۴} با در نظر گرفتن توزیع دابلت روی سطح داخلی جسم به بررسی جریان پرداختند[۱۰]. در سال ۲۰۰۵، های و ویسونیو^{۱۵} با استفاده از شبکه تطبیقی به حل عددی جریان سطح آزاد پرداختند[۱۱]. کارکتیرا^{۱۶} و همکاران به صورت تحلیلی جریان

- 1 Forlanini
- 2 Guidoni
- 3 Vladimirov
- 4 Kotchin
- 5 Parkin
- 6 Bai and Han
- 7 Blasi
- 8 Daskovsky
- 9 Filippov
- 10 Perturbation
- 11 Kouh
- 12 Rhee
- 13 Bourgoyne
- 14 Chen and Liu
- 15 Hay and Visonneau
- 16 Carcaterra

حول یک هیدروفویل نوسانی را حل کردند [۱۲]. نکته دیگری که در وسایل نقلیه دریایی باید در نظر داشت سیستم کنترلی می باشد. سیستم کنترلی وسایل مجهز به هیدروفویل که در زیر آب حرکت می کنند به صورت دستی می باشد و انتخاب بهینه ترین حالت عملکردی آن به مهارت شخصی بستگی دارد که معیار این مهارت بر اساس مشاهده امواج می باشد. در حالی که اگر تخمینی از امواج موجود باشد می توان بهترین عملکرد سیستم را به خوبی تخمین زد. همین امر ضرورت مطالعه بر روی هیدروفویل ها را نشان می دهد. کیم و یاماتو^{۱۷} سعی کردند که امواج تولیدی توسط وسایل دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و در سیستم کنترلی استفاده کنند [۱۳]. اکسی و سالوس^{۱۸} با استفاده از روش پتانسیل هیدروفویل سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. در سال ۲۰۰۸، صادق حسینی و همکاران سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه سازی کردند [۱۵]. در سال ۲۰۰۹، دیوکین^{۱۹} و همکاران به بررسی پدیده لایه مرزی، جدایش جریان، تبدیل جریان از آرام به آشسته و نیز پدیده واماندگی پرداختند [۱۶]. در سال ۲۰۱۰، مونچ^{۲۰} و همکاران به بررسی اثر متقابل سیال و سازه یک هیدروفویل نوسانی کاملاً غرق شده در آب پرداختند [۱۷].

با توجه به فیزیک مسئله هیدروفویل ها عواملی همچون لزجت، آشفتگی جریان و اثر سطح آزاد، حل تحلیلی جریان اطراف آنها را دشوار ساخته است و در صورت استفاده از حلهای تحلیلی، نیاز به فرضیات ساده کننده مختلفی می باشد و در برخی شرایط نتایج مناسبی ارائه نمی شود. به همین منظور در این مقاله از یک نرم افزار تجاری حل عددی برای شبیه سازی جریان کمک گرفته شده است. نکته دیگری که در کارهای پیشین دیده نشده، بررسی نوع هیدروفویل می باشد. در این مقاله اثر ضخامت و انحنای هیدروفویل ها و نیز اثر فاصله هیدروفویل ها از سطح آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر سرعت هیدروفویل ها نیز تحلیل شده است.

۲- معادلات و روابط ریاضی

معادلات اساسی که بقای جرم، ممنتوم و اسکالر را بیان می کند در حالت برداری و مستقل از سیستم مختصات به صورت زیر بیان می شوند:

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

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

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi - q_j)}{\partial x_j} = S_i^\phi \quad (3)$$

تانسور تنش و بردار شار^{۲۱} بر اساس متغیرهای وابسته بیان می شوند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی به فرم زیر است:

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

17 Kim and Yamato
18 Xie and Vassalos
19 Ducoin
20 Munch
21 Scalar Flux

ρ چگالی، \vec{V} بردار سرعت و ϕ به عنوان یک متغیر مستقل اساسی (انرژی) است. \vec{q} بردار شار اسکالر است و از قانون فوریه بدست می آید:

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

معادلات (۱)، (۲) و (۳) توسط روش حجم محدود گسسته شده، توسط الگوریتم فشار مبنا به روش ضمنی حل می شوند.

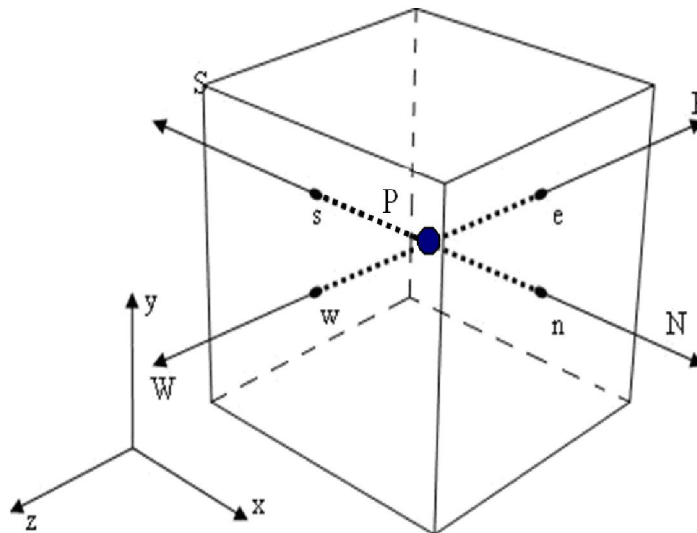
۳- گسسته سازی:

طبیعت معادلات اساسی به گونه ای است که می توان با انتگرال گیری کلی روی حجم کنترل ها مجهولات مسئله را بدست آورد و به تحلیل جریان پرداخت. از آنجایی که در اغلب موارد این انتگرال گیری به صورت تحلیلی مشکل می باشد لذا از روش عددی استفاده می شود. برای حل عددی نیاز به گسسته سازی معادلات وجود دارد که با استفاده از روش حجم محدود انجام می شود. ابتدا محوطه حل^{۲۲}، به تعدادی حجم گسسته شده یا سلول تقسیم شده، به طوری که همه متغیرها در مرکز سلول ها ذخیره می شوند. حال این معادلات برای همه حجم کنترل ها بر اساس تئوری گوسین^{۲۴} بکار گرفته می شود. برای هر متغیر ϕ (که می تواند مولفه های سرعت باشد) شکل کلی معادلات به فرم زیر می باشد:

$$\frac{\partial V}{\partial t} [(\rho\phi)_p^{n+1} - (\rho\phi)_p^n] + I_e - I_w + I_n - I_s = S_{\phi} \delta V \quad (6)$$

به طوری که I ترکیبی از ترم جابه جایی^{۲۳} (I^C) و ترم نفوذ^{۲۴} (I^D) می باشد. شار نفوذ به وسیله تفاضل مرکزی بیان می شود و می توان آن را برای سطح سلول مثل e در شکل (۱) به صورت زیر بیان کرد:

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



شکل (۱) حجم کنترل یک سلول و وجوه آن

- 22 Domain
- 23 Convection
- 24 Diffusion

گسسته سازی شار جابه جایی به توجه خاصی نیاز دارد و همین امر است که موضوع توسعه طرحهای تفاضلی مختلف شده است. هنگامی که با مسائلی روبرو می شویم که دارای ترم جابه جایی می باشند لازم است که خاصیت مورد بررسی را در روی سطح سلول بدست آوریم. اما محل ذخیره کمیت ها در روی سطح سلول ها نمی باشند و در مرکز سلول ذخیره می شوند. به همین خاطر روش های مختلفی برای بدست آوردن مقدار خاصیت در سطح سلول وجود دارد.

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

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

که F_e نشان دهنده ترم جابه جا شده در واحد سطح سلول و ϕ_e نیز مقدار خاصیت در سطح سلول است و مقدار آن را از طریق روشهای مختلفی می توان بدست آورد. در این تحقیق از روش تفاضلی بالا دست مرتبه دوم برای بدست آوردن ترم های جابه جایی استفاده شده است.

با قرار دادن ترم نفوذ و جابه جایی در معادله گسسته شده، نتایج معادلات گسسته شده برای هر تقریبی به فرم زیر است:

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

به طوری که a شامل ضرایب نفوذ و جابه جایی می باشد.

حال با گسسته سازی معادلات حاکم می توان جریان حاکم را حل نمود. در این تحقیق، معادلات حاکم طبق دستورالعمل فوق گسسته سازی می شود. سپس بر اساس روش فشار مبنا و بر پایه الگوریتم SIMPLE جریان حول بالواره حل می شود. مدل توربولانسی که در این پروژه در نظر گرفته شده $k - \varepsilon$ می باشد که معادلات حاکم بر آن به صورت زیر است:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

لزجت توربولانسی و ترم پخش معادلات فوق از رابطه زیر بدست می آید:

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

$$\Gamma'_\phi = \left(\frac{\mu_t}{\sigma'_\phi} \right) \quad (13)$$

برای مدل سازی جریان دو فازی نیز از Volume of Fluid (VOF) استفاده شده است. در روش VOF، در محل تماس دو فاز معادله

پیوستگی درصد حجمی (Volume Fraction) برای یک فاز یا هر دو فاز حل می شود. اگر تعداد فازها q باشد این معادله عبارتند از:

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

به طوری که \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 می باشد. $S_{\alpha q}$ نیز

ترم چشمه می باشد که در این مسئله مقدار آن صفر است. α بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز q می باشد. معادله درصد

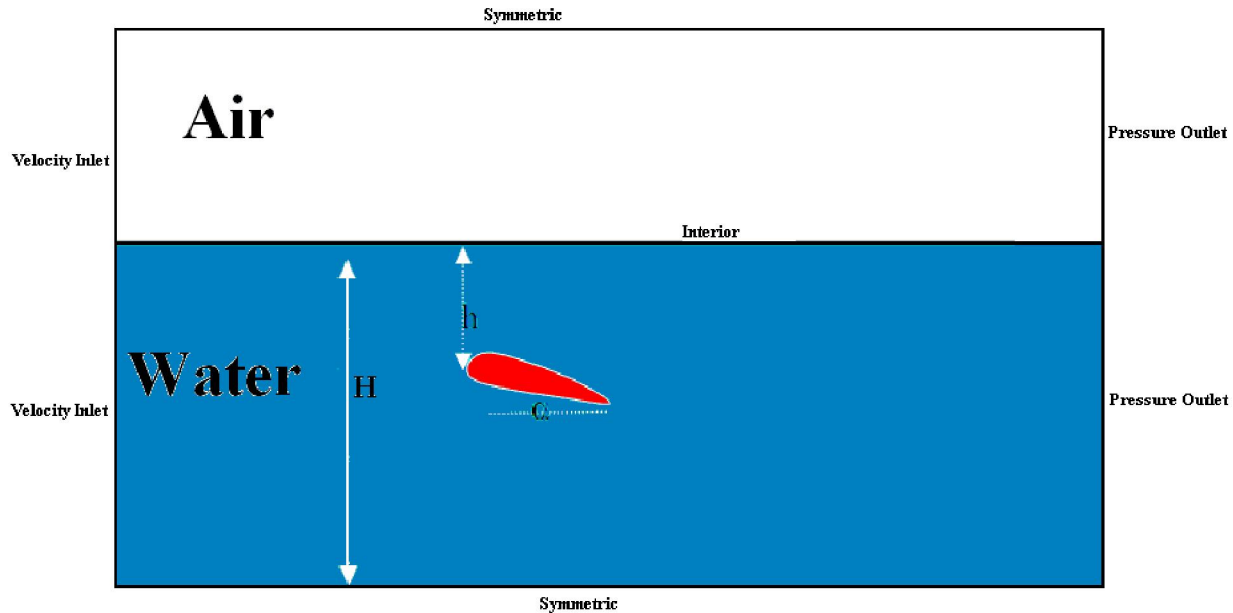
حجمی (Volume Fraction) برای فاز اولیه قابل حل نخواهد بود. لذا درصد حجمی فاز اولیه بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

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

معادله درصد حجمی می تواند به هر دو روش ضمنی و صریح حل شود که در این تحقیق به روش ضمنی حل شده است.

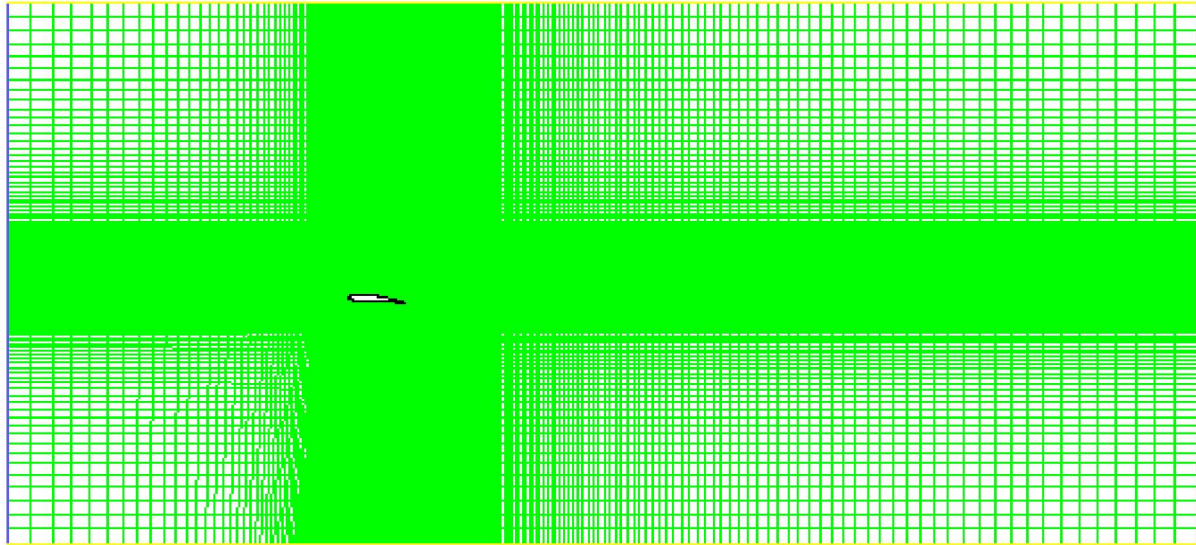
۴- شبکه بندی و شرایط مرزی:

حوزه حل جریان در شکل (۲) نشان داده شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده به این صورت است که شرط مرزی ورودی برای هر دو فاز Velocity inlet و شرط مرزی خروجی Pressur outlet می باشد. برای فاز آب شرط فشار استاتیکی اعمال شده است. شرط مرزی مشترک بین دو فاز یک مرز داخلی بوده و سطح بالا و پایین نیز Symmetric در نظر گرفته شده است.



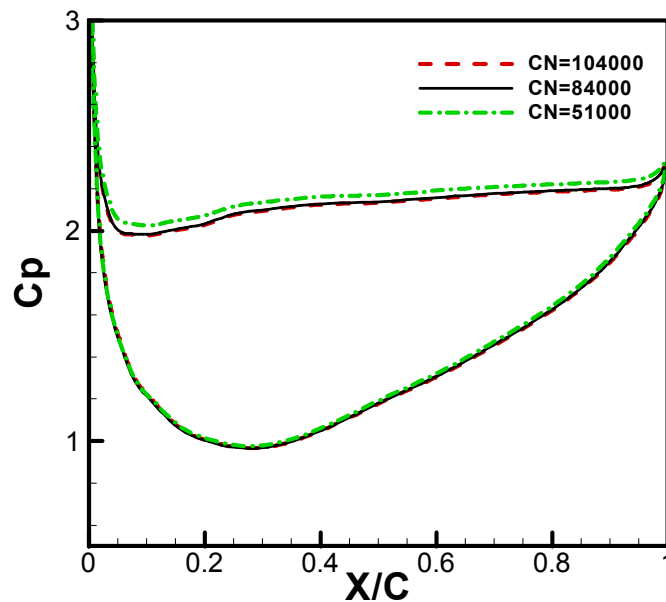
شکل (۲) حوزه حل و شرایط مرزی جریان

در ناحیه ای که سیال آب قرار دارد، شرط فشار هیدرواستاتیکی اعمال شده و فشار در ناحیه ای که هوا قرار دارد، برابر فشار اتمسفر $P=101325 \text{ atm}$ در نظر گرفته شده است. سرعت ورودی بر اساس عدد فرود بدست آمده به طوری که در این تحقیق از $Fc=1$ استفاده شده است. عدد فرود بر حسب طول وتر هیدروفویل می باشد. لذا سرعت جریان به ترتیب $V=3.13, 3.75 \text{ m/s}$ بدست می آید. سرعت ورودی برای آب و هوا نیز یکسان در نظر گرفته شده است. فشار در مرز خروجی برای هوا برابر فشار اتمسفر $P=101325 \text{ atm}$ و در ناحیه آب شرط فشار هیدرواستاتیکی اعمال شده است. نوع شبکه ای که در اینجا استفاده شده است از نوع H می باشد و ابعاد حوزه حل نیز به اندازه کافی مناسب در نظر گرفته شده است (شکل ۳).



شکل (۳) نحوه شبکه بندی حول هیدروفویل

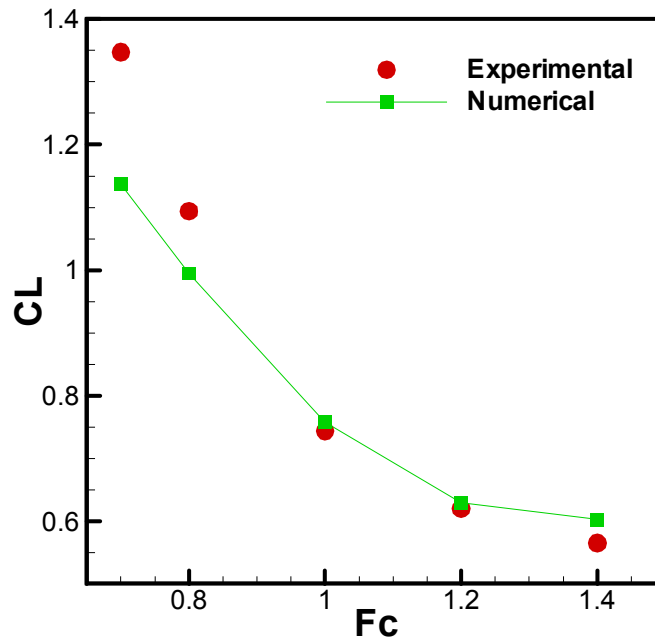
برای شبیه سازی عددی در ابتدا لازم است که استقلال از شبکه مورد بررسی قرار بگیرد. لذا جریان حول هیدروفویل NACA 4412 به ازای سه شبکه مختلف حل شد. عدد فرود این جریان برابر یک $Re=1$ ، سرعت جریان $V=3.13$ m/s، عمق فرورفتگی $h/c=1$ و زاویه حمله هیدروفویل نیز ۵ درجه در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل (۴) مشخص است در تعداد سلول های ۸۴۰۰۰ مسئله به استقلال رسیده و با ریزتر کردن شبکه دیگر تغییرات چندانی ایجاد نمی شود.



شکل (۴) بررسی استقلال از شبکه

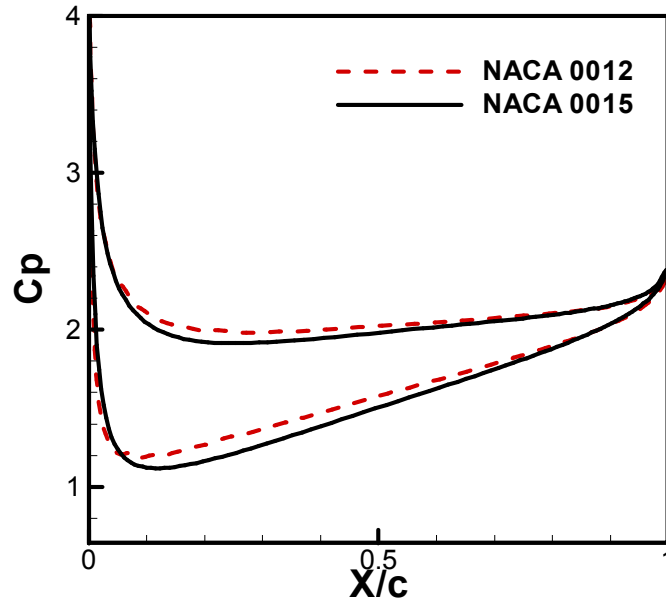
۵- نتایج:

در شبیه سازی های عددی لازم است که صحت حل عددی نشان داده شود. در این تحقیق نیز به بررسی صحت حل پرداخته شده است. نتایج ضریب برا حول NACA 4412 با زاویه حمله ۵ درجه و $h/c=1$ در شکل (۵) نشان داده شده است. مقایسه نتایج تجربی [۷] و عددی در شکل فوق، تطابق خوبی را نشان می دهد.

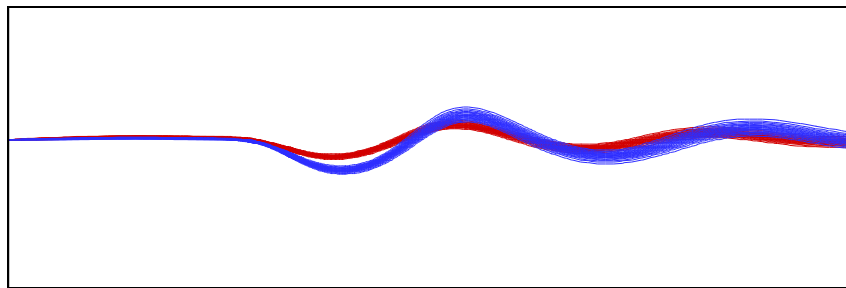


شکل (۵) مقایسه حل عددی حاضر با نتایج تجربی

حال با اطمینان از صحت حل عددی می توان به بررسی پارامترهای مورد نظر پرداخت. شکل (۶) نمودار توزیع ضریب فشار روی سطح هیدروفویل را نشان می دهد. در این شبیه سازی، اثر ضخامت هیدروفویل ها مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش ضخامت هیدروفویل فشار در سطح بالا و پایین آن کاهش می یابد ولی کاهش فشار در سطح بالا بیشتر بوده و به همین دلیل نیروی برا افزایش پیدا کرده است. ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که جدول مذکور نشان می دهد با افزایش ضخامت نیروی پسا نیز زیاد می شود اما نسبت نیروی برا به پسا کاهش می یابد. همین رفتار نیز بین هیدروفویل های NACA 4412, 4415 نیز مشاهده می شود. شکل (۷) پروفیل سطح آزاد را نشان می دهد و نشان می دهد که هر چه هیدروفویل ضخامت بیشتری داشته باشد، دامنه موج ایجاد شده بزرگتر می شود.



شکل (۶) مقایسه هیدروفویل های NACA 0012, 0015 به ازای $h/c=1$, $Fe=1$



شکل (۷) مقایسه پروفیل سطح آزاد برای NACA0015 (—) و NACA 0012 (—)

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

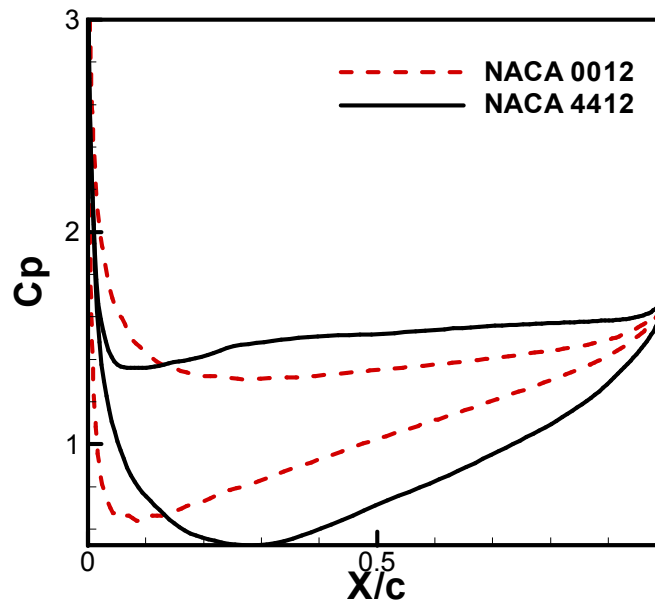
$h/c=1$, $Fe=1$	CL	CD	CL/CD
NACA 0012	0.478	0.0882	5.422
NACA 0015	0.4878	0.1055	4.6237
NACA 4412	0.7585	0.1129	6.7183
NACA 4415	0.7799	0.1383	5.6393

شکل های (۹) و (۸) نمودار توزیع فشار روی سطوح هیدروفویل را برای انحنای مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش انحنای فشار در سطح بالا کاهش و در سطح پایین مقدار آن افزایش می یابد، در نتیجه نیروی برا افزایش می یابد. نیروی پسا نیز با افزایش انحنای روند افزایشی دارد ولی مقدار افزایش نیروی برا بیشتر بوده و باعث می شود که روند نسبت برا به پسا افزایش یابد. وقتی انحنای هیدروفویل زیاد می شود، سرعت در سطح بالا افزایش یافته و موجب کاهش فشار در آن ناحیه می شود. از طرفی با افزایش انحنای سیال عبوری از سطح زیرین با مانع بزرگتری در تماس است که موجب افزایش نیروی پسا و فشار خواهد بود. مقادیر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا به ازای انحنای مختلف در جدول (۱) نشان داده شده است.

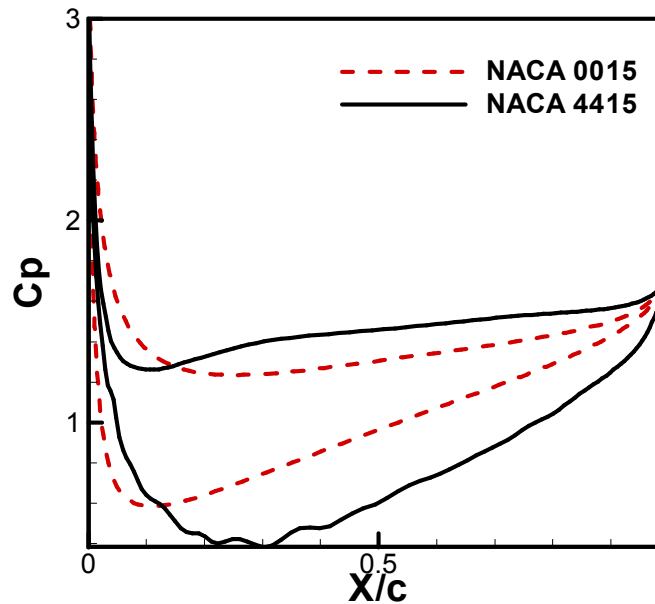
جدول (۲) نشان دهنده درصد تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی در اثر انحنا می باشد. نکته قابل توجه این است که با افزایش انحنا، به ازای ضخامت کمتر، نسبت برا به پسا رشد بیشتری دارد هر چند که ضریب برا و پسا تغییرات کمتری دارد.
 شکل (۱۰) پروفیل موج دار سطح آزاد را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش انحنا، دامنه موج بزرگتر می شود.

جدول (۲) درصد تغییرات ضرایب برا و پسا و نسبت آنها

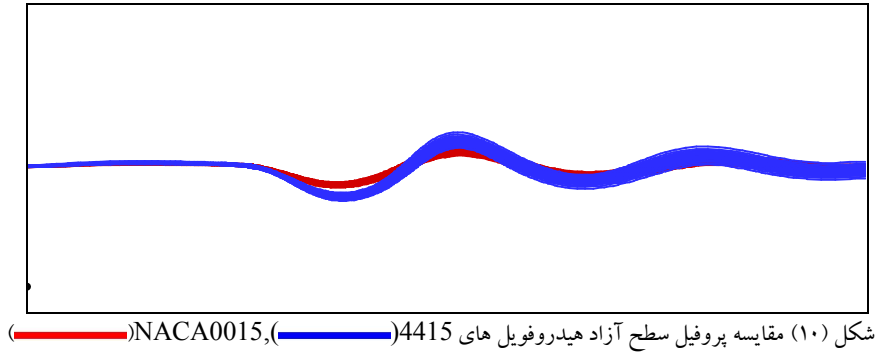
$h/c=1, Fc=1$	CL%	CD%	CL/CD%
0012-4412	58.68	28	23.9
0015-4415	59.88	31	21.96



شکل (۸) مقایسه هیدروفویل های NACA0012,4412 به ازای $h/c=1, Fc=1.2$



شکل (۹) مقایسه هیدروفویل های NACA0015,4415 به ازای $h/c=1, Fc=1.2$

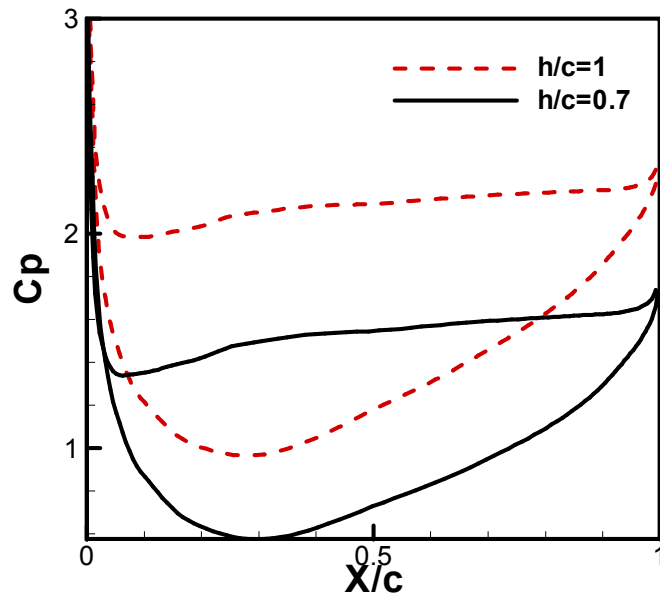


شکل (۱۰) مقایسه پروفیل سطح آزاد هیدروفویل های 4415 (—) و NACA0015 (—)

شکل (۱۱) نمودار توزیع فشار روی سطوح هیدروفویل NACA 0012 را به ازای عمق فرورفتگی مختلف نشان می دهد. هر چه عمق فرورفتگی هیدروفویل بیشتر باشد، فشار در روی سطوح افزایش می یابد. این یک امر معقولی است، زیرا با افزایش عمق فرورفتگی فشار هیدرواستاتیکی افزایش می یابد. اما با افزایش عمق فرورفتگی اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین هیدروفویل نیز بیشتر می شود به عبارت دیگر فشار در سطح پایین هیدروفویل افزایش بیشتری دارد. جدول (۳) ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا را نشان می دهد.

جدول (۳) بررسی اثر عمق فرورفتگی هیدروفویل بر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا

$F_c=1$	h/c	CL	CD	CL/CD
NACA 0012	0.7	0.3768	0.08638	4.3619
	1	0.478	0.08816	5.422
NACA 4415	0.7	0.6226	0.1264	4.9256
	1	0.7799	0.1383	5.6393

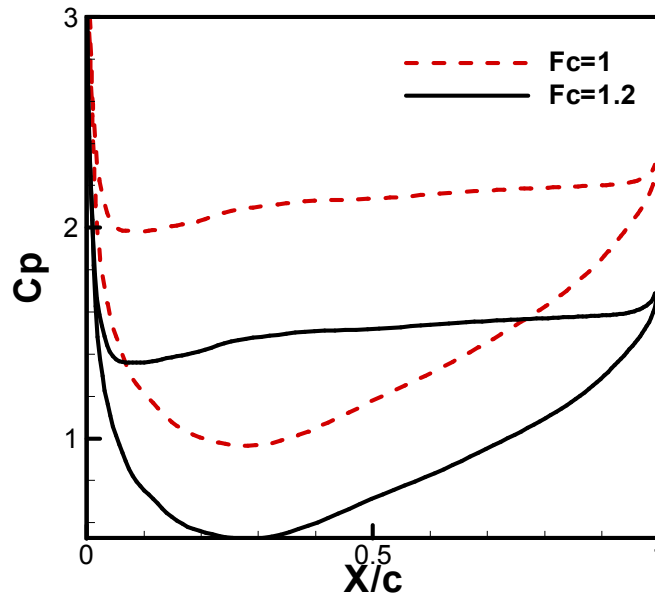


شکل (۱۱) مقایسه اثر فاصله از سطح آزاد برای هیدروفویل NACA0012 به ازای $F_c=1$

شکل (۱۲) توزیع فشار بر هیدروفویل NACA4412 را به ازای عدد فرود مختلف نشان می دهد. همانطور که نمودار نشان می دهد با افزایش عدد فرود فشار کاهش می یابد. اما کاهش فشار در سطح پایین، افت بیشتری دارد و موجب کاهش ضرایب برا می شود. همچنین ضریب پسا نیز روند نزولی داشته که در مجموع نسبت برا به پسا کاهش خواهد بود.

جدول (۴) بررسی اثر عدد فرود مختلف بر ضرایب برا و پسا و نسبت برا به پسا

h/c=1	Fc	CL	CD	CL/CD
NACA 0015	1	0.4878	0.1055	4.6237
	1.2	0.3759	0.09067	4.1458
NACA 4412	1	0.7585	0.1129	6.7183
	1.2	0.6293	0.1061	5.93112



شکل (۱۲) مقایسه اثر فرود برای هیدروفویل NACA4412 به ازای h/c=1

۶- نتیجه گیری

گسترش کاربرد وسایل دریایی و نقش پررنگ آنها در جهان کنونی محققین را به مطالعه بیشتر برانگیخته است. یکی از موارد پر کاربرد، استفاده از هیدروفویل ها می باشد که به کمک آن دستیابی به عملکرد بهینه مقدر می شود. در این تحقیق تاثیر ضخامت و انحنای هیدروفویل ها و اثر عمق فرورفتگی آن در آب و نیز تاثیر عدد فرود مورد بررسی قرار گرفت. نکته قابل توجه این است که با افزایش ضخامت هیدروفویل ضرایب برا و پسا بزرگتر می شوند، ولی نسبت برا به پسا روند کاهشی دارد. از طرفی با افزایش انحنای، هر چند که ضریب برا و پسا افزایش می یابد، اما نسبت برا به پسا نیز روند صعودی دارد. لذا در انتخاب مقطع مناسب برای هیدروفویل ها، هر چه ضخامت کمتر و انحنای بیشتر باشد، عملکرد هیدرودینامیکی آن بیشتر است. همچنین با افزایش عمق فروری ضریب برا و پسا روند رو به رشدی دارند، همچنین نسبت برا به پسا نیز افزایشی است. با افزایش عدد فرود، ضرایب برا و پسا کاهش می یابد و در مجموع نسبت برا به پسا نیز کم می شود.

۷- مراجع

1. Guidoni A. , "Seaplanes - Fifteen Years of National Aviation", Journal. R.A.S., Vol. 32, No. 205, 25-64, 1928.
2. Parkin B.R., Perry B. and Wu T.Y., "Pressure distribution on a Hydrofoil running near the water surface", Journal of Applied Physics, Vol.27, Page232-240, 1956.
3. Bai, K.J. and Han J.H., "A localized finite element method for the non-Linear steady waves due to a two-dimensional hydrofoil", Journal of Ship Research, Vol.38, Page42-51, 1994.

4. Blasi P. De, Romano G. P., Felice F. Di and Lalli F., "Experimental Study of Breaking Wave Flow Field Past a Submerged Hydrofoil by LDV". *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 10, No. 4, (ISSN 1053-5381), 2000.
5. Daskovsky Mark, "The hydrofoil in surface proximity, theory and experiment" *Ocean Engineering*, Vol. 27, Page 1129–1159, 2000.
6. Filippov S.I., "Flow Past a Submerged Hydrofoil", *Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 36, No. 3, page 489–496, 2001.
7. Kouh J.S., Lin T.J., Chau S.W., "Performance analysis of two-Dimensional hydrofoil under free surface", *Journal of National Taiwan University*, Vol. 86, 2002.
8. Rhee S.H., Kim S.-E., Ahn H., Oh J. and Kim H., "Analysis of a jet-controlled high-lift hydrofoil With a flap" *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 30, Page 2117–2136, 2003.
9. Bourgoyne Dwayne A., "Flow over a Hydrofoil with Trailing Edge Vortex Shedding at High Reynolds Number" *Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan*, 2003.
10. Chen C.K. and Liu H., "A submerged vortex lattice method for Calculation of the flow around three-dimensional hydrofoil", *Journal of Ship Mechanics*, Vol. 9(2), 2005.
11. Hay A. and Visonneau M., "Computation of free-surface flows with local mesh adaptation" *International Journal for Numerical Method Sinfluids*, Int. J. Numer. Meth. Fluids: 785–816 2005.
12. Carcaterra Antonio, Dessi Daniele and Mastroddi Franco, "Hydrofoil vibration induced by a random flow: A stochastic perturbation approach", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, Page 401–432, 2005.
13. Kim Sang-Hyun and Yamato Hiroyuki, "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, Page 22–31, DOI 10.1007/s00773-004-0183-9, 2005.
14. Xie Nan and Vassalos Dracos, "Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface", *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 34, Page 1257–1264, 2007.
15. Sadathosseini S.H., Mousaviraad S.M., Firoozabadi B. and Ahmadi G., "Numerical Simulation of Free-Surface Waves and Wave Induced Separation", *Journal of Scientia Iranica*, Vol. 15, No. 3, page 323, Sharif University of Technology, 2008.
16. Ducoin Antoine, Andre Jacques, Astolfi a, Deniseta François and Sigrist Jean-François, "Computational and experimental investigation of flow over a transient pitching hydrofoil", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, Page 728–743, 2009.
17. Munch C., Ausoni P., Braun O., Farhat M., Avellan F., "Fluid–structure coupling for an oscillating hydrofoil", *Journal of Fluid and Structure*, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.002, 2010.