



تحلیل عملکرد بالک در یک هیدروفویل سه بعدی غوطه‌ور در آب

محمدحسن جوارشکیان^۱، احمد پارسانیا^۲، علی اسماعیلی^۳

^۱دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، javareshekeyan@ferdowsi.um.ac.ir
^۲مری گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه پیام نور مرکز شیراز، parsania.spnu@gmail.com
^۳دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، aliesmaeli30316@yahoo.com

چکیده

دریایی دارای هیدروفویل را تخمین زده و در سیستم کنترلی استفاده کنند[۹]. در سال ۲۰۰۸، سادات حسینی و همکاران سطح آزاد امواج و شکست آنها و نیز جدایش ناشی از امواج را به صورت عددی شبیه سازی کردند[۱۰]. در سال ۲۰۰۹، دیوکین (Ducoin) و همکاران به بررسی به تحقیقات عددی و تجربی بر جریان روی هیدروفویل پرداختند و پدیده لایه مرزی، جدایش جریان، تبدیل جریان از آرام به آشفتگی و نیز پدیده واماندگی را تحلیل کردند[۱۱]. در سال ۲۰۱۰، مونچ (Munch) و همکاران به بررسی اثر متقابل سیال و سازه یک هیدروفویل نوسانی کاملاً غرق شده در آب پرداختند[۱۲].

بعد از انجام تحقیقات فراوان همچنان دست‌یابی به بازده بیش‌تر شناورها و در نتیجه آن طراحی دقیق‌تر هیدروفویل، خواسته اصلی بوده و این خواسته محققان را به سمت ابتکار راه‌ها و تکنیک‌های جدید سوق می‌دهد [۱۳]. یکی از این روش‌ها، استفاده از بالک در هیدروفویل‌های سه بعدی می‌باشد، به طوری که می‌توان نیروهای هیدرودینامیکی هیدروفویل‌ها را متاثر کرده و در نتیجه عملکرد شناورها را افزایش داد. از طرف دیگر با اضافه کردن بالک به انتهای هیدروفویل‌ها، عمق غوطه‌وری یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بوده و ارتباط مستقیمی با نحوه تشکیل امواج سطحی آب دارد. نکته قابل توجه این است که اگرچه تحقیقات زیادی بر روی هیدروفویل‌ها انجام شده است، اما اکثر این مطالعات معطوف به شبیه‌سازی هیدروفویل‌های دو بعدی بدون بالک کاملاً مغروق که فاصله زیادی با سطح آزاد آب دارند، پرداخته شده است. به دلیل مشکلاتی که در شبیه‌سازی‌های عددی هیدروفویل نزدیک سطح آزاد وجود دارد، افزودن بالک این مشکلات را دو چندان می‌کند. از طرفی افزودن بالک و محل قرار گیری آن می‌تواند عملکرد آن را افزایش دهد.

آنچه که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته، شبیه‌سازی سه بعدی جریان لزج آشفتگی حول یک هیدروفویل غوطه‌ور در نزدیکی سطح آب بوده و اثر محل قرار گیری بالک نوک بررسی شده است. برای دست‌یابی به این هدف، ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی عددی و حل معادلات جریان سیال حول هیدروفویل به کمک یک روند عددی بر مبنای حجم محدود شبیه سازی انجام شده است. سپس اثر افزودن بالک بررسی شده و تغییرات نیروهای هیدرودینامیکی و نیز امواج سطحی تحلیل گردیده است.

معادلات

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

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\delta(\rho \vec{V})}{\delta t} + \text{div}(\rho \vec{V} \otimes \vec{V} - \vec{T}) = \vec{S}_v \quad (2)$$

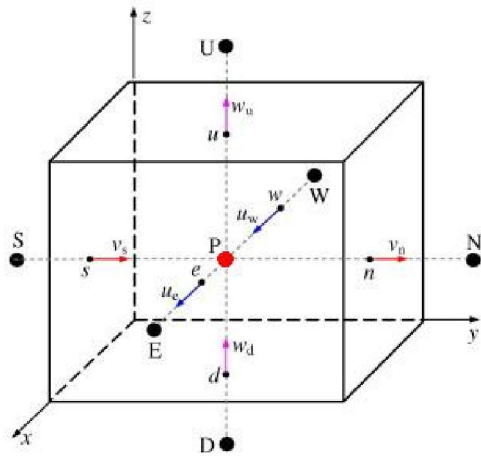
هدف از این تحقیق، بررسی اثر اضافه کردن بالک به یک هیدروفویل سه بعدی و تاثیر محل قرارگیری آن بر عملکرد هیدروفویل به صورت عددی است. نحوه تاثیرگذاری اثر بالک بر امواج تشکیل شده در سطح آزاد مطالعه شده است. در روش عددی استفاده شده، از الگوریتم فشار مینا و از تکنیک SIMPLE برای حل معادلات ناویراستوکس استفاده گردیده، همچنین به منظور شبیه سازی موج سطحی از مدل دو فازی درصد سیال استفاده شده است. در ابتدا بخشی از نتایج حاصل از حل عددی با نتایج منتشر شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد و با توجه به صحت روند شبیه سازی عددی، اثر بالک بر عملکرد هیدرودینامیکی هیدروفویل و میزان تاثیرگذاری آن امواج سطحی بحث و تحلیل گردیده است. نتایج نشان داده‌اند که جابجا کردن بالک نوک بال از بالا به پایین سبب افزایش ضریب برآ و همچنین ایجاد یک موج قوی‌تری بر روی سطح آب خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بالک- هیدروفویل- سه بعدی- سطح آزاد- غوطه‌وری

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین اجزایی که به طور وسیع در کشتی‌ها و وسایل سطحی و زیر سطحی مورد استفاده قرار گرفته، هیدروفویل‌ها می‌باشند و به دلیل اهمیت فراوان آن‌ها در افزایش توانایی‌های وسایل دریایی، طراحی دقیق و صحیح هیدروفویل‌ها مورد توجه محققان و طراحان ابزارهای دریایی شده است. این هیدروفویل‌ها به سطح زیرین شناورها متصل بوده و در هنگام حرکت شناور، به صورت غوطه‌ور در زیر آب و نزدیک به سطح آزاد با سرعتی برابر با سرعت شناور حرکت می‌کنند. در اثر عبور جریان آب بر روی سطوح هیدروفویل، اختلاف فشاری در دو طرف سطح هیدروفویل ایجاد شده که در نتیجه آن نیروی‌هایی تولید می‌شوند. مقدار این نیروها تاثیر مستقیمی بر افزایش سرعت و بازده شناور تندر دارند. در نتیجه طراحی صحیح و دقیق هیدروفویل‌ها می‌تواند بسیار مورد اهمیت واقع شود. تاکنون تحقیقات زیادی به صورت عددی [۳-۱] و تجربی [۴] بر هیدروفویل‌ها انجام شده و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است.

داسکوفسکی (Daskovsky) اثرات نزدیکی سطح بر روی نیروی برآ تولیدی توسط هیدروفویل را به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار داد[۵]. فلیپو (Filippov) نیز جریان پایا عبوری از یک هیدروفویل را به صورت تحلیلی و با استفاده از روش اغتشاشات حل کرد[۶]. کیو (Kouh) و همکاران نیز در سال ۲۰۰۲ به تحلیل عملکرد یک هیدروفویل دو بعدی تحت سطح آزاد پرداختند[۷]. کارکتیرا (Carcatera) و همکاران به صورت تحلیلی جریان حول یک هیدروفویل نوسانی را حل کردند[۸]. کیم و یاماتو (Kim and Yamato) سعی کردند که امواج تولیدی توسط وسایل



شکل ۱- حجم کنترل یک سلول و وجوه آن

مدل توربولانسی که در این تحقیق در نظر گرفته شده Spalart Allmaras (SA) می‌باشد. این مدل یک روش یک معادله‌ای است که با به کار گیری معادله‌ی انرژی جنبشی تلاطم، آشفتگی جریان را مدل می‌کند.

معادله انرژی جنبشی تلاطم برای یک جریان قابل تراکم به فرم زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i K) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega K + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial K}{\partial x_j} \right), \quad (10)$$

$\beta^* = 0.09$

پارامتر μ که معرف لزجت عنوان شده، از این پس لزجت آشفتگی را نیز در دل خود خواهد داشت و این نکته باید در تمامی معادلات (RANS+ انرژی جنبشی تلاطم) رعایت شود. به عبارت دیگر:

$$(11)$$

کمیت ω در اینجا معرف عبارت اتلاف انرژی جنبشی تلاطم می‌باشد. اما معادله انرژی جنبشی به تنهایی نمی‌تواند یک سیستم معادلات بسته را به همراه معادلات RANS تشکیل دهد و نیاز به روابط دیگری نیز هست تا دستگاه معادلات با تعداد مجهولات و معلومات برابری به دست آید. به همین دلیل در مدل SA به جای معادله انرژی جنبشی از معادله بقای لزجت آشفتگی استفاده می‌گردد. فرم کلی این معادله که گویای یک مدل تک معادله‌ای می‌باشد به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \rho \tilde{\nu} \right) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 - Y_\nu + S_\nu \quad (12)$$

$\mu_t = \rho \cdot \tilde{\nu} \cdot f_{\nu 1}$
 $f_{\nu 1} = \frac{X^3}{X^3 + C_{\nu 1}^3}$

در این معادله $\tilde{\nu}$ لزجت سینماتیکی آشفتگی، ν لزجت سینماتیکی است. عبارت G_ν برابر تولید آشفتگی و عبارت Y_ν نیز بیانگر تلفات است. برای مدل سازی جریان دو فازی نیز از روش درصد سیال (Volume of Fluid (VOF)) استفاده شده است. در روش VOF، در محل تماس دو فاز، معادله پیوستگی درصد حجمی برای یک فاز با هر دو فاز حل می‌شود. اگر تعداد فازها q باشد این معادله عبارتند از:

$$\frac{\delta \nu}{\delta t} [(\rho \Phi)_p^{n+1} - (\rho \Phi)_p^n] + I_e - I_w + I_n - I_s + I_u - I_d = S_{\alpha q} \delta \nu \quad (13)$$

$$\frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} + \text{div}(\rho \vec{V} \Phi - \vec{q}) = \vec{S}_\Phi \quad (3)$$

\vec{T} تانسور تنش و \vec{q} بردار شار (Scalar Flux) بر اساس متغیرهای وابسته بیان می‌شوند. تانسور تنش برای سیال نیوتنی به فرم زیر است:

$$\vec{T} = -P\vec{I} \quad (4)$$

به طوری که 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 می‌آید:

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

معادلات (1)، (2) و (3) توسط روش حجم محدود گسسته شده، توسط الگوریتم فشار مبنا به روش ضمنی حل می‌شوند.

طبیعت معادلات اساسی به گونه ای است که می‌توان 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 می‌باشد لذا از روش عددی استفاده می‌شود. برای حل عددی نیاز به گسسته سازی معادلات وجود دارد که با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌شود. ابتدا محوطه حل، به تعدادی حجم گسسته شده یا سلول تقسیم شده، به طوری که همه متغیرها در مرکز سلول ها ذخیره می‌شوند.

حال این معادلات برای همه حجم کنترل ها بر اساس تئوری گوسی بکار گرفته می‌شود. برای هر متغیر Φ (که می‌تواند مولفه های سرعت باشد) شکل کلی معادلات به فرم زیر می‌باشد:

$$\frac{\delta \nu}{\delta t} [(\rho \Phi)_p^{n+1} - (\rho \Phi)_p^n] + I_e - I_w + I_n - I_s + I_u - I_d = S_\Phi \delta \nu \quad (6)$$

به طوری که I ترکیبی از ترم جابه جایی (Convection- I^c) و ترم نفوذ (Diffusion- I^D) می‌باشد. شار نفوذ به وسیله تفاضل مرکزی بیان می‌شود و می‌توان آن را برای سطح سلول مثل e در شکل (1) به صورت زیر بیان کرد:

$$I_e^D = D_e(\Phi_p - \Phi_E) - S_e^D \quad (7)$$

گسسته سازی شار جابه جایی به توجه خاصی نیاز دارد و همین امر است که موضوع توسعه طرحهای تفاضلی مختلف شده است. در مسائلی که دارای ترم جابه جایی می‌باشند لازم است که خاصیت مورد بررسی را در روی سطح سلول بدست آید. اما محل ذخیره کمیت ها در روی سطح سلول ها نمی‌باشند و در مرکز سلول ذخیره می‌شوند. 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:

$$I_e^C = (\rho \cdot V \cdot A)_e \Phi_e = F_e \Phi_e \quad (8)$$

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 می‌توان 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 می‌باشد.

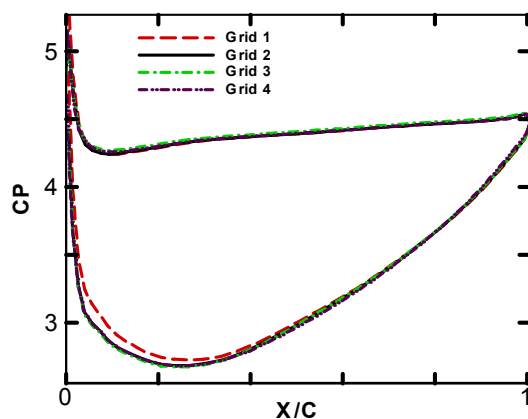
حال با گسسته سازی معادلات حاکم می‌توان جریان حاکم را حل نمود. در این تحقیق، معادلات حاکم طبق دستورالعمل فوق گسسته سازی می‌شود. سپس بر اساس روش فشار مبنا و بر پایه الگوریتم SIMPLE جریان حول بالواره حل می‌شود.



عددی جریان حول هیدروفویل با مقطع NACA4412، نسبت منطری (Aspect ratio (AR)) ۶، عدد فرود برابر یک و زاویه حمله ۵ درجه با نتایج تجربی [۳] مقایسه شده است که سازگاری خوب بین مقادیر به دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج منتشر شده نشان دهنده صحت حل عددی می باشد.

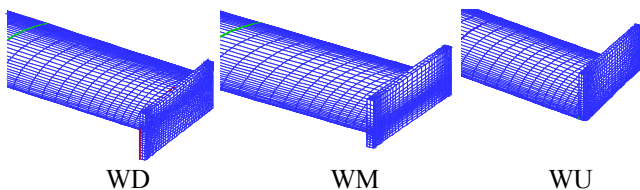
جدول ۱- مشخصات شبکه های مختلف

	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
c	1	1	1	1
b	3c	3c	3c	3c
h	c	c	c	c
u	5c	5c	3c	5c
d	5c	5c	3c	5c
f	10c	10c	7c	10c
ba	14c	14c	10c	14c
l	10c	20c	8c	20c
Cell	642740	837920	455240	500880
C_L	1.025	1.049	1.058	1.062
$C_L(Xie et al)$	0.980			



شکل ۳- اثر ابعاد حوزه حل و تعداد سلول بر توزیع فشار در صفحه تقارن.

حال با توجه به دستیابی به شبکه‌ای مستقل و صحت حل عددی، به منظور بررسی اثر بالک، هیدروفویل سه بعدی با $AOA=5^\circ$, $AR=6$ و سطح مقطع NACA4412 در نظر گرفته شده، به طوری که ارتفاع بالک ۰/۴ می باشد. در حقیقت این بالک مطابق شکل در سه موقعیت مختلف قرار گرفته (شکل ۴) و اثرات آن‌ها بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و همچنین شکل موج ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ الگوی سطح آب را به صورت سه بعدی در اطراف هیدروفویل در حالت بالک بالا نشان می دهد. همانطور که این شکل نشان می دهد در اثر حرکت هیدروفویل بالک دار در سطح زیرین آب، امواج سطحی ایجاد می شود.



شکل ۴- حالت‌های مختلف قرار گیری بالک، (الف) بالک بالا (WU)، (ب) بالک میانی (WM)، (ج) بالک پایین (WD).

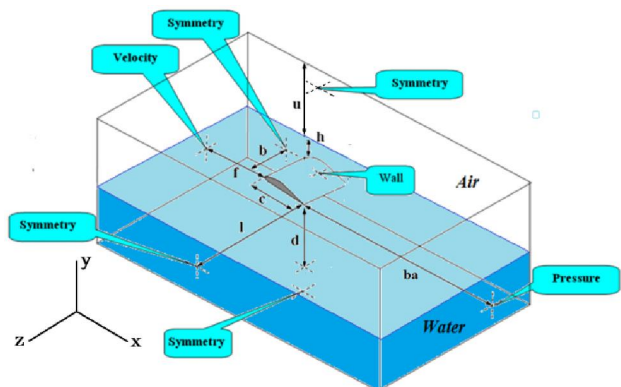
به طوری که \dot{m}_{pq} دبی جرمی انتقال یافته از فاز p به فاز q و \dot{m}_{qp} دبی جرمی انتقال یافته از فاز q به فاز p می باشد. $S_{\alpha q}$ نیز ترم چشمه می باشد که در این مسئله مقدار آن صفر است. α بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز q می باشد. معادله درصد حجمی (Volume Fraction) برای فاز اولیه قابل حل نخواهد بود. لذا درصد حجمی فاز اولیه بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (14)$$

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

نتایج

در این تحقیق اثر بالک بر لبه‌های یک هیدروفویل سه بعدی که در نزدیکی سطح آزاد آب حرکت می کند، به صورت عددی مطالعه شده و جریان سیال از نوع دائم، آشفتنه، لزج و تراکم ناپذیر می باشد. به این منظور، در اولین گام، شبکه بندی حول هیدروفویل انجام شده و سپس حوزه حل و شرایط مرزی مشخص گردیده است. هیدروفویل مورد مطالعه دارای سطح مقطع NACA4412 بوده و شبکه اطراف آن به صورت H می باشد. حوزه حل و شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین شرط مرزی برای هر دو فاز آب و هوا در ورودی، سرعت و در خروجی فشار در نظر گرفته می شود. سطح هیدروفویل و بالک به صورت دیواره و مرز بین آب و هوا یک مرز داخلی در نظر گرفته شده و بقیه سطوح خارجی (بالا، پایین، چپ و راست) از نوع شرط تقارن می باشند. عدد فرود (Fc) مربوطه بر مبنای طول وتر برابر یک می باشد. ابعاد حوزه حل نیز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا بر جواب حاصله از حل عددی تاثیر نگذارد.

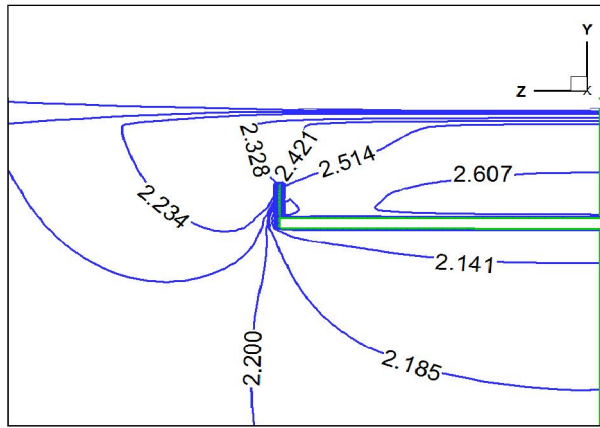
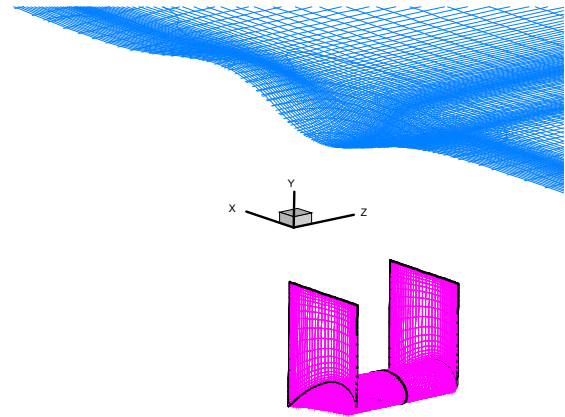


شکل ۲- شرایط مرزی و ابعاد میدان محاسباتی دو بعدی

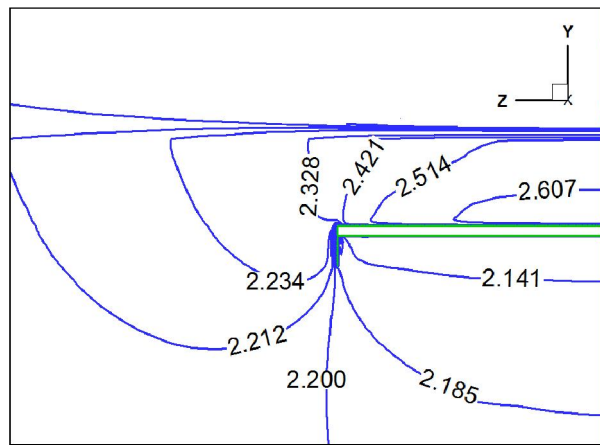
در گام بعدی، لازم است اثر تعداد سلول‌ها بررسی شده و دستیابی به شبکه‌ای که جوابهای حاصله از آن مستقل از تغییر در تعداد سلول‌ها باشد، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق نیز استقلال از شبکه بررسی شده، به طوری که در تعداد سلول حدود ۷۰۰۰۰۰ شبکه مستقل شده است. مشخصات ابعاد و تعداد سلول حوزه حل در جدول ۱ نشان داده شده و نمودار توزیع فشار در صفحه وسط هیدروفویل نیز برای شبکه های مختلف در شکل ۳ نمایان گشته است. با توجه به این نمودار، حالت ۲ به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است.

نکته دیگری که باید در شبیه سازی های عددی مد نظر داشت، اعتبارسنجی حل عددی می باشد. در جدول ۱ ضریب برای حاصله از حل

هیدروفویل و بالک پایین سبب بوجود آمدن ناحیه کم سرعت بزرگتر در سطح زیرین هیدروفویل خواهد شد.

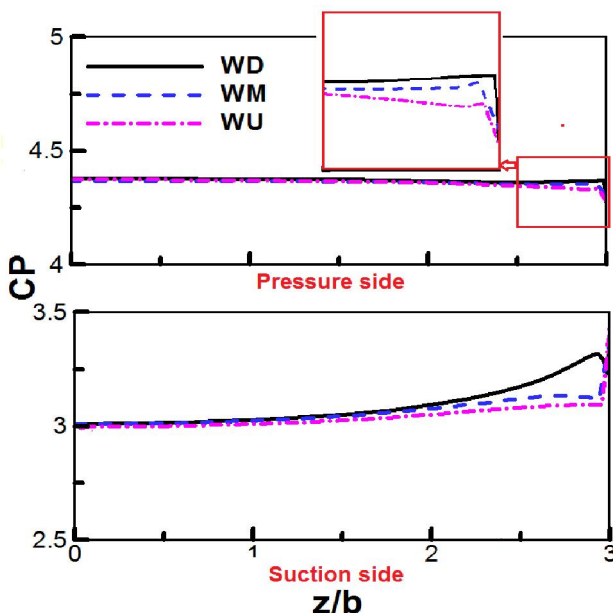


(الف)



(ب)

شکل ۷- کانتور سرعت در صفحه طولی گذرنده از وسط هیدروفویل (الف) بالک بالا (WU)، (ب) بالک پایین (WD) ($X/C=0.5$)

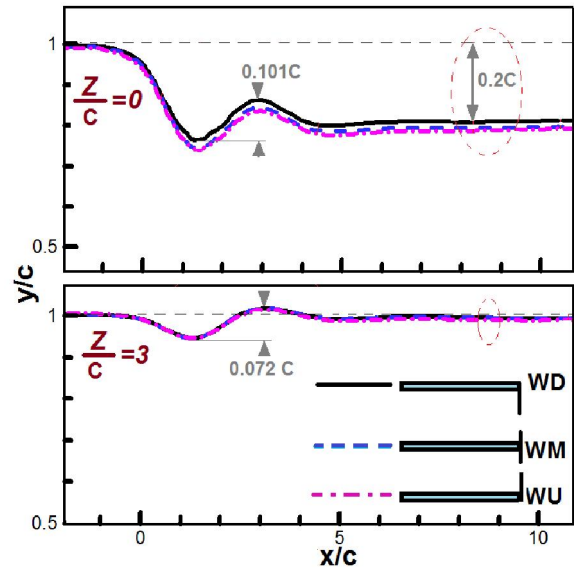


شکل ۸- توزیع فشار در روی سطح هیدروفویل در راستای طولی گذرنده از وسط وتر ($X/C=0.5$)

شکل ۵- شکل موج سطحی در صفحه تقارن برای حالت WU

در شکل ۶ منحنی شکل موج را برای سه حالت بالک در صفحه وسط هیدروفویل ($Z/c=0$) و صفحه گذرنده از بالک ($Z/c=3$) با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه شکل موج نشان می دهد که برای حالت بالک پایین WD دامنه موج در صفحه تقارن 0.101 بوده در حالیکه در صفحه گذرنده از بالک برابر 0.072 است. این رفتار برای حالت بالک وسط و بالک پایین نیز مشابه است. مقایسه همچنین نشان می دهد که دنباله موج در صفحه تقارن پایینتر از سطح آزاد آب قرار دارد در حالیکه دنباله در صفحه گذرنده از بالک تقریباً به سطح آ

این شکل همچنین نشان می دهد که در صفحه تقارن هیدروفویل ($Z/c=0$) با جابجایی بالک از پایین به بالا موج تشکیل شده قویتر شده است.



شکل ۶- مقایسه شکل موج برای سه حالت بالک در صفحه وسط هیدروفویل ($Z/c=0$) و صفحه گذرنده از بالک ($Z/c=3$)، مقیاس $y/c=10$

شکل ۷ کانتور توزیع سرعت در صفحه طولی گذرنده از وسط وتر هیدروفویل را برای دو حالت بالک بالا (WU) و بالک پایین (WD) نشان می دهد. مقایسه خطوط هم سرعت در شکل ۷-الف و ۷-ب بیانگر اینست که در حالت بالک بالا ناحیه پر سرعت در روی سطح بالای بال (سطح مکش) نسبت به حالت بالک پایین بیشتر است. همچنین ناحیه کم سرعت در سطح پایین هیدروفویل (سطح پر فشار) در این حالت کوچکتر است به عبارتی ناحیه کم سرعت در سطح زیرین برای حالت بالک پایین بزرگتر است. نتیجه اینکه بالک بالا سبب بوجود آمدن ناحیه پر سرعت بزرگتر در سطح بالایی



- [5] Daskovsky Mark, 2000. "The Hydrofoil in Surface Proximity, Theory and Experiment". Journal of Ocean Engineering, Vol. 27, pp. 1129-1159.
- [6] Filippov, S.I., 2001. "Flow Past a Submerged Hydrofoil". Journal of Fluid Dynamics, Vol. 36, No. 3, pp. 489-496.
- [7] Kouh, J. S., Lin, T. J., Chau, S.W, 2002. "Performance an Analysis of Two-Dimensional hydrofoil under Free Surface". Journal of National Taiwan University, Vol. 86.
- [8] Carcaterra 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.
- [9] Kim, S., 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 and Technology, Vol. 10, pp.22-31.
- [10] Sadathosseini, S., Mousaviraad, S., Firoozabadi, B., and Ahmadi, G., 2008. "Numerical Simulation of Free-Surface Waves and Wave Induced Separation". Scientia Iranica, Vol.15, pp.323-331.
- [11] Ducoin, A., Jacques, A., François, D., and Jean-François, S., 2009. "Computational and experimental investigation of flow over a transient pitching hydrofoil". European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol.28, pp. 728-743.
- [12] Münch, C., Ausoni, P., Braun, O., and Farhat, M., 2010. Avellan F. Fluid-structure coupling for an oscillating hydrofoil, Journal of Fluids and Structures, Vol.26, pp. 1018-1033.
- [13] 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.

شکل ۸ توزیع فشار در رو سطح هیدروفویل در راستای طولی گذشته از وسط وتر ($X/C=0.5$) را نشان می‌دهد. مقایسه نشان می‌دهد که در سطح زیرین هیدروفویل (سطح فشار بالا) تفاوت چندانی در توزیع فشار وجود ندارد فقط در ناحیه نزدیک نوک هیدروفویل اختلاف فشار جزئی بوجود آمده است. در ناحیه بالای هیدروفویل (سطح مکش) با انتقال بالک از بالا به پایین فشار در سطح بالای هیدروفویل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در حالت بالک بالا مکش بیشتری در سطح بالای هیدروفویل بوجود آمده است.

جدول ۲ ضریب برای هیدروفویل را برای سه حالت مختلف بالک نشان می‌دهد. مقایسه ضرایب برآ در این حالات نشان می‌دهد که بیشترین ضریب برآ مربوط به حالت بالک بالا می‌باشد و با انتقال بالک از بالا به پایین ضریب برآ کاهش می‌یابد. با ملاحظه توضیحات ارائه شده برای توزیع فشار در قسمت قبل علت این امر را می‌توان ناشی از مکش بیشتر در سطح بالای هیدروفویل در حالت بالک بالا دانست.

جدول ۲- مشخصات شبکه های مختلف

حالت	CL
WU	1.0532
WM	1.0460
WD	1.0253

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به اهمیت هیدروفویل‌ها و نیاز مبرم به افزایش عملکرد آن‌ها، استفاده از بالک می‌تواند تاثیرگذار باشد. به این منظور در این تحقیق شبیه‌سازی عددی جریان لزج تراکم ناپذیر در اطراف یک هیدروفویل سه بعدی غوطه‌ور در آب انجام شده و اثر محل قرارگیری بالک مطالعه گردیده است. در روش عددی استفاده شده، از الگوریتم فشار مبنا و از تکنیک SIMPLE برای حل معادلات ناویراستوکس استفاده گردیده، همچنین به منظور تسخیر موج سطحی از مدل دو فازی درصد سیال استفاده شده است. برای صحنه‌گذاری بر حل عددی، بخشی از نتایج حاصله با نتایج منتشر شده مقایسه گردیده که تطابق بسیار خوب آن‌ها حاکی از صحت حل عددی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان دادند که با جابجا کردن بالک نوک هیدروفویل از پایین به بالا، فشار در ناحیه بالای هیدروفویل (سطح مکش) کمتر شده در حالیکه در سطح زیرین هیدروفویل تغییر چندانی حاصل نمی‌شود. این اثر باعث افزایش ضریب برآ و همچنین ایجاد یک موج قویتر بر روی سطح آب خواهد شد.

مراجع

- [1] Chen, C.K., Liu, H., 2005. "A submerged vortex lattice method for Calculation of the flow around three-dimensional hydrofoil", Journal of Ship Mechanics, Vol. 9, pp.156-163.
- [2] 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.
- [3] Xie, N., and Vassalos D., 2007. "Performance Analysis of 3D Hydrofoil Under Free Surface". Journal of Ocean Engineering, Vol. 34, pp.1257-1264.
- [4] Bourgoyne, D., 2003. "Flow over a hydrofoil with trailing edge vortex shedding at high-Reynolds number", Doctor of Philosophy, Mechanical Engineering, University of Michigan.