

مدل سازی سه بُعدی هیدروفویل های سری ناکا، اپلر و گوتینگن برای تخمین و مقایسه ی عملکرد هیدرودینامیکی در حرکت

نوسانی هیو

سید مهدی ساجدی^۱، حسن قاسمی^۲، پرویز قدیمی^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا، sajfar1669@aut.ac.ir

^۲استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا، gasemi@aut.ac.ir

^۳استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا، pghadimi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۲۴

چکیده

دینامیک هیدروفویل ها در آب های عمیق از اهمیت فراوانی برخوردار است. با تعیین ضرایب معادلات حرکت می توان دینامیک هیدروفویل ها و عوامل مؤثر بر ناپایداری آن را شناخت. در این مقاله، ضرایب هیدرودینامیکی لیفت و درگ حرکت نوسانی هیو سه هیدروفویل NACA 0009، EPPLER 838 و GOTTINGEN 11K با استفاده از CFD در فرکانس های مختلف محاسبه و مقایسه می گردد. تعیین عملکرد هیدرودینامیکی به روش تجربی هزینه بر بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق دارد. بنابراین، استخراج این ضرایب به روش عددی و ایجاد آزمایشگاه مجازی می تواند مفید باشد. محاسبات در سه فرکانس انجام شده است. این فرکانس ها به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ Hz می باشند. نتایج نشان دهنده ی مستقل بودن درگ از فرکانس و افزایش لیفت ۴۰ درصدی مشاهده شده است. تمام محاسبات در حالت بدون زاویه حمله انجام شده که نشان دهنده تاثیر حرکت نوسانی در مقابل حرکت بدون نوسان می باشد. در این حالت، لیفت به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

کلمات کلیدی

ضرایب هیدرودینامیکی، هیدروفویل، حرکت هیو، دینامیک سیالات محاسباتی.

CFD 3D Modeling of Hydrofoils NACA 0009, Eppler 838 and Gottingen 11K for Estimation Comparison and of Hydrodynamic in Heave Oscillating Motion

Seyed Mahdi Sajedi¹, Hasan Ghassemi², parviz ghadimi³

¹ Ph.D. student of Marine Hydrodynamics, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology sajfar1669@aut.ac.ir

²Professor of Marine Hydrodynamics, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology gasemi@aut.ac.ir

³professor of Marine Hydrodynamics, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology pghadimi@aut.ac.ir

(Submitted: 2017/Feb/22; Accepted: 2017/Apr/13)

Abstract

Hydrofoils dynamics in deep waters is important. With the coefficients can be dynamic equations of motion of the hydrofoils and influencing factors of instability knowing it. In this article hydrodynamic lift and drag coefficients oscillating motion heave three hydrofoil naca 0009, Eppler 838 and Gottingen 11k using CFD at different frequencies were calculated and compared. Determining the hydrodynamic coefficients to the experimental method is expensive, and requires careful laboratory equipment, The exploitation of these coefficients to numerical methods and create virtual laboratories can be useful. The results show that the majority is independent of frequency coefficients, especially at high frequencies.

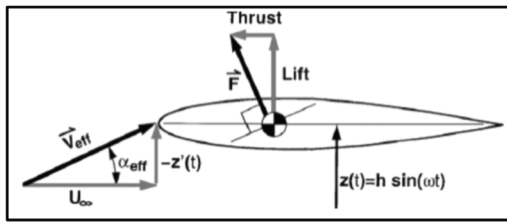
Keywords

Hydrodynamics coefficients; hydrofoil; Heave motion; CFD;

۱- مقدمه

حرکت هارمونیک فویل با الهام از حرکت نوسانی ماهی‌های اقیانوسی انجام گرفته است. در برخی وسایل نقلیه‌ی زیرسطحی یا سطحی از این الگوی حرکتی استفاده می‌شود. در این خصوص؛ یعنی حرکت نوسانی فویل، تحقیقات فراوانی انجام گرفته است. البته، به علت پیچیده بودن حرکت یک فویل نوسانی، معمولاً با جداسازی حرکت هیو و پیچ در آزمایشگاه و روش‌های عددی مدل‌سازی می‌گردد [۱].

این نتیجه رسید که ضرایب لیفت زیاد وابستگی زیادی به ورتکس لبه‌ی حمله دارد [۹]. دیکینسون در سال ۱۹۸۲ به صورت گسترده و همزمان بر روی اثرات تأخیر استال، سیرکولاسیون و ویک به صورت تجربی بررسی‌هایی انجام داد [۱۰]. همچنین، افراد بسیاری به صورت دویعدی حرکت نوسانی فویل را مورد تحقیق قرار دادند. ایده‌ی تشکیل ورتکس متناوب بر پشت فویل توسط لیتیل و وو برای فویل‌های دویعدی مطرح شد [۲، ۴].



شکل (۲): نیروی تراست تولیدی برای ترکیب هیو خالص و رو به جلو [۲].

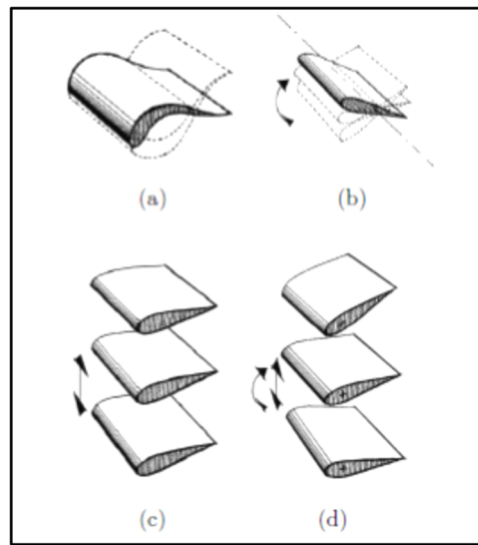
در سال ۱۹۹۸ جونز و همکارانش بر روی ایرفویل حرکت اجباری هیو ایجاد کردند و به صورت تجربی و عددی این حرکت را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. در این بررسی آرایش ویک به صورت خیابان وان کارمن نمایش داده شد.

در سال ۲۰۱۲ مارسل و همکارانش بررسی بر روی یک فویل با حرکت هیو و پیچ را انجام دادند. این تست‌ها در عمق‌های مختلف از سطح آب انجام شد [۱۲].

در سال ۲۰۱۵ ریچارد و اشکای بر روی یک فویل نوسانی انعطاف‌پذیر به صورت تجربی کار کردند و اثرسختی و اینرسی را بر تولید تراست بررسی کردند [۱۶]. در این بررسی، افزایش بازدهی در حرکت ترکیبی هیو و پیچ در مقابل کاهش تراست در حرکت هیو خالص مشاهده می‌شود.

چو و ژائو در سال ۲۰۱۳ طی یک ابتکار جدید میزان انرژی تولیدی یک فویل نوسانی با حرکت ترکیبی هیو و پیچ در یک جریان با سرعت متغیر در محور y و با یک شیب ثابت بررسی کردند.

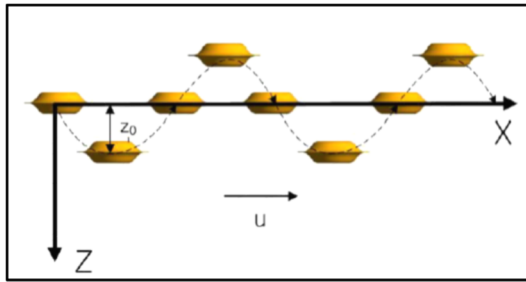
در این تحقیق، بر روی سه نوع هیدروفویل NACA EPPLER 838، 0009 و GOTTINGEN 11K به صورت عددی بررسی شده است و ضرایب درگ و لیفت آن



شکل (۱): انواع حرکت باله، (a) فویل انعطاف‌پذیر، (b) پیچ، (c) هیو، (d) ترکیب هیو و پیچ [۳].

نیروهای سیالاتی وارد بر فویل‌ها به منظور شناخت عوامل مختلف بر مانور و رانش در حرکت سازه‌های دریایی و بکارگیری فناوری آن در صنعت مورد بررسی قرار گرفته شده است. دُم سریع‌ترین حیوانات دریایی شباهت بسیار زیادی به فویل دارند. به همین دلیل، فویل‌ها به صورت گسترده به صورت عددی و تجربی مورد تحقیق قرار گرفته‌اند [۲، ۳، ۴، ۵]. حرکت هارمونیک فویل باعث به وجود آمدن ورتیسسته‌ای (گردابه) در لبه‌ی انتهایی و کناره‌های فویل شده است و این در شرایطی است که در لبه‌ی حمله گردابه به مقدار قابل توجه‌ای وجود دارد و این الگو باعث پیچیده شدن جریان می‌شود [۶، ۷، ۸].

فریموس در سال ۱۹۸۸ حرکت هیو و پیچ هیدروفویل ناکا ۰۰۱۵ را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد و به



شکل (۴): یک فویل تحت انجام حرکت هیو واداشته.

معادله‌ی ۲ بیانگر حرکت هیو اجباری شناور است که دامنه‌ی حرکت هیو و فرکانس آن معلوم می‌باشد.

۴- روش حل مسأله

۴-۱- معادلات حاکم

در این تحقیق، از نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX 16.0 برای مدل‌سازی حرکات به روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی میدان حل استفاده می‌شود. معادله‌ی بقای جرم برای سیال غیر قابل تراکم در هر سه جهت اصلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی ۴، ρ چگالی سیال و u_i مؤلفه‌ی سرعت هر یک از سه جهت اصلی x ، y و z است. در این مسئله به دلیل وجود سطح آزاد اثرات بویانسی و نیروی گرانش مطرح است. معادله‌ی دیگر، معادله‌ی بقای مومنوم است که در هر یک از سه جهت اصلی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، F_i نیروی حجمی، g_i شتاب گرانش و τ_{ij} تانسور تنش‌های رینولدز است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

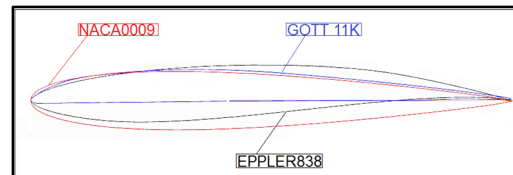
$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (6)$$

در رابطه‌ی ۶، δ_{ij} تابع دلتای کرونکر است که برای $i = j$ برابر با یک و در غیر این صورت صفر است. با توجه

در فرکانس‌های مختلف مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفته است.

۲- هندسه مدل

در ابتدا سه فویل NACA 0009، EPPLER 838 و GOTTINGEN 11K از لحاظ هندسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سه فویل در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.



شکل (۳): هندسه سه فویل NACA 0009، EPPLER 838 و GOTTINGEN 11K [۱۱].

می‌توان خصوصیات هیدروفویل‌ها را از لحاظ ضریب لیفت و درگ در عدد رینولدز خاص و زوایای مختلف مورد بررسی قرار داد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بدون زاویه حمله لیفت وجود ندارد که این موضوع اساس تفاوت فویل نوسانی و فویل بدون حرکت نوسانی می‌باشد. همچنین، چنین نمودارهایی برای فویل‌های ناکا و گوتینگن موجود است.

۳- حرکت هیو هامونیک

زمانی که فویل تحت حرکت هیو هامونیک قرار می‌گیرد، معادلات حرکت به صورت زیر نوشته می‌شوند:

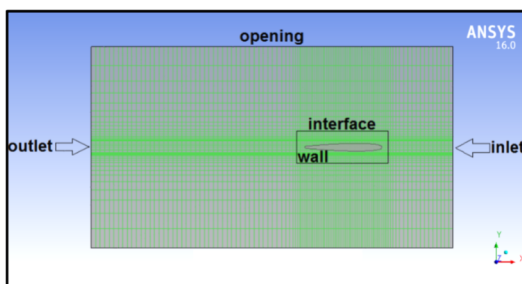
$$\begin{aligned} Z = Z_a \cdot \cos(\omega t) \quad (1) \\ (M_{33} + A_{33}) \cdot \ddot{Z} + B_{33} \cdot \dot{Z} + C_{33} \\ = X_{03a} \cdot \cos(\omega t + \epsilon_{X_{03z}}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{53} \cdot \ddot{Z} + B_{53} \cdot \dot{Z} + C_{53} \cdot Z \\ = X_{05a} \cdot \cos(\omega t + \epsilon_{X_{05z}}) \end{aligned} \quad (3)$$

شکل ۴ یک فویل را تحت انجام حرکت هیو نشان می‌دهد. Z_a دامنه‌ی حرکت و ω فرکانس آن است.

شرایط مرزی یک ناحیه حل میزان ورود و خروج جریان به ناحیه را کنترل می‌کند. در واقع در یک کد CFD، این شرایط مرزی است که جواب را به دامنه محاسباتی القا می‌کند. در این قسمت شرایط مرزی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است:

شرایط مرزی ورودی سرعت ورود جریان به ناحیه حل را مشخص می‌کند. فشار در مرز ورودی با برون‌یابی از سلول‌های همسایه به دست می‌آید. معمولاً، شرایط مرزی خروجی، فشار جریان خروجی را تعیین می‌کند. سرعت در این مرز با استفاده از برون‌یابی از سلول‌های داخلی تعیین می‌شود. فشار و سرعت بر این مرز نیز با استفاده از برون‌یابی تعیین می‌شود. بر دیواره‌ی بدنه‌ی مورد بررسی نیز شرط مرزی دیواره که شامل دو شرط نفوذناپذیری و عدم لغزش می‌باشد، اعمال می‌شود. در نتیجه، سرعت روی سلول‌های متصل به بدنه، برابر با سرعت حرکت بدنه خواهد بود. فشار در این سلول‌ها نیز با استفاده از برون‌یابی تعیین می‌شود. برای شرط مرزی اطراف دامنه‌ی محاسباتی نیز دیواره با شرط قابل لغزش انتخاب شده است. برای مرزهای جانبی، مرز کف و مرز بالا، شرط مرزی دیوار بدون لغزش انتخاب شده است. طبیعی است محل این مرزها باید به قدر کافی از خود جسم دور انتخاب شود تا انتخاب شرط مرزی دیواره برای آنها، جواب‌های مسأله را از واقعیت فیزیکی دور نکند. در این تحقیق، برای هر سه هیدروفویل، مسأله به صورت گذرا شبیه‌سازی شده است.



شکل (۵): شرایط مرزی.

۳-۴- مشخصات هندسی و شبکه‌بندی میدان

حل

شرایط مرزی حل عبارتند از: فشار نسبی که در خروجی فشار استاتیکی و در نواحی دور صفر در نظر گرفته

معادلات ۵ و ۶، معادله‌ی ۷ به صورت زیر حاصل می‌شود که شامل جملات تنش‌های رینولدز است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \rho g_i \end{aligned} \quad (7)$$

در معادله‌ی ۷ جمله‌ی $\frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$ مربوط به آشفتگی می‌باشد که برای مدل‌سازی آن نیاز به استفاده از یک مدل آشفتگی است. برای این امر از مدل ترکیبی دو معادله‌ای انتقال تنش برشی برشی رینولدز (SST) که بر پایه‌ی مدل $k - \omega$ بنا نهاده شده، استفاده شده است. این مدل از رفتار تابع دیواره اتوماتیک بهره می‌گیرد. مدل SST ترکیبی از مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ است. بنابراین، از مزایای هر دو مدل یعنی قدرت بالای همگرایی مدل رینولدز بالای $k - \varepsilon$ و رفتار اتوماتیک دیوار مدل رینولدز پایین $k - \omega$ را توأمأ برخوردار است. تغییر تدریجی از مدل $k - \omega$ به مدل $k - \varepsilon$ به ترتیب از نواحی نزدیک به دیواره تا نواحی دور از دیواره توسط یک تابع ترکیب انجام می‌شود. این مدل دو معادله‌ای، مناسب‌ترین مدل برای تخمین شروع و میزان جدایی جریان سیال است (منتر ۲۰۰۳) [۱۵].

مسأله‌ی مهم و مطرح دیگر این است که عملکرد الگوریتم و صحت جواب‌ها به شدت به گام زمانی وابسته است (فرزیگر (۱۹۹۹)) [۱۶]. برای تعیین گام زمانی از عدد CFL که به صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده است.

$$CFL = \frac{U \Delta t}{\Delta} \quad (8)$$

در این رابطه، Δ اندازه‌ی مش می‌باشد. به منظور پایداری حل عددی، عدد CFL باید در کل کمتر از یک باشد. همچنین، انتخاب مقدار مناسب برای گام زمانی برای رسیدن به جواب‌های درست بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در نتیجه و با ارزیابی فیزیک مسأله و با توجه به رابطه‌ی ۸ و با انجام محاسبات، گام زمانی در تمام تحلیل‌های پیش رو ۰/۰۱ ثانیه قرار داده می‌شود.

۲-۴- شرایط مرزی و شرایط اولیه

شد. سرعت آب در ورودی ۱ متر بر ثانیه می‌باشد. در دامنه شرط عدم لغزش برقرار است.

۳۰۰ با وجود حداقل ۱۰ گره درون لایه مرزی آشفته بوده است.

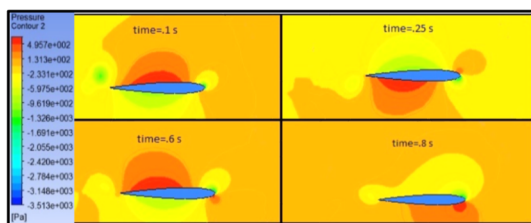
جدول (۱): مشخصات فویل و حرکت هارمونیک برای مدل‌سازی عددی.

مشخصات فویل	مقدار	واحد
span	100	mm
chord	100	mm
سرعت ورودی	1	m/s
سرعت هارمونیک	$0.5\sin(\omega t)$	m/s
حرکت هارمونیک	$(0.5/\omega)\cos(\omega t)$	m

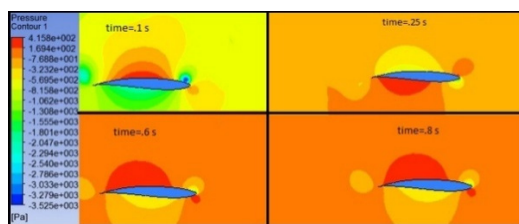
۵- نتایج مدل‌سازی

۵-۱- توزیع فشار

یکی از نتایج مهم در تحلیل عددی توزیع فشار در اطراف جسم می‌باشد. لذا، با توجه به تغییر مکان در هر زمان توسط هیدروفویل باید در چند لحظه مشخص توزیع فشار را نمایش داد. در شکل‌های ۷ و ۸ توزیع فشار در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۶ و ۰/۸ نشان داده شده است.



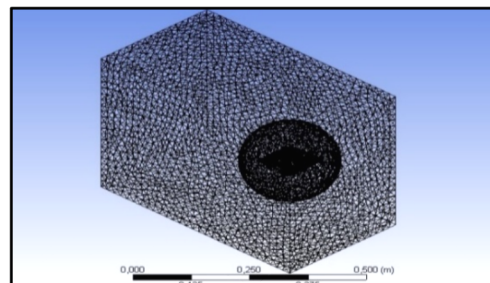
شکل (۷): توزیع فشار برای هیدروفویل NACA 0009 در فرکانس ۱۰ Hz.



شکل (۸): توزیع فشار برای هیدروفویل EPPLER 838 در فرکانس ۱۰ Hz.

جدول (۲): پارامترهای عددی.

1	time	1 s
2	Simulation type	Transient
3	Time step	1/100
4	Turbulence model	K-ε
5	Convergence	Max. residuals of 10 ⁻⁴
6	iterations	10 iterations per time step

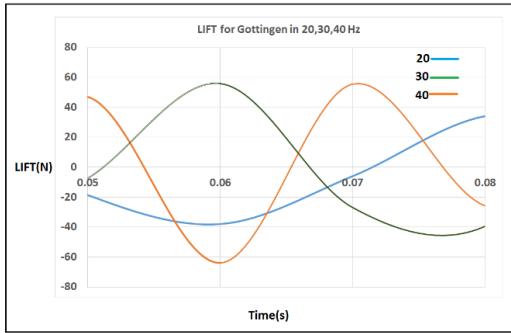


شکل (۶): مش دومین.

۵-۲- لیفت و درگ

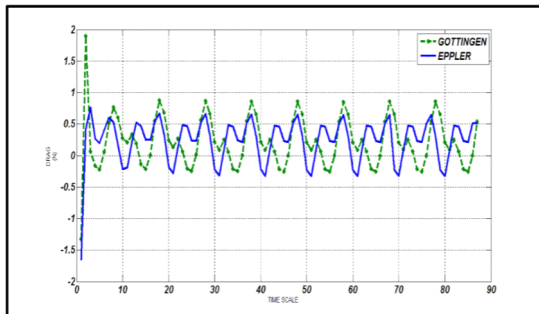
مقدار لیفت و درگ قطعاً به صورت نوسانی می‌باشد. یک فویل ناکا متقارن در حالت بدون زاویه حمله مقدار لیفت آن صفر می‌شود. اما در فویل با حرکت هیو خالص در جریان (همانند شکل ۹) یک سرعت نوسانی حاصل می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌شود این تغییرات در هر سیکل نسبت به زاویه نشان داده شده است. در شکل ۱۰ برای فویل‌های اپلر، ناکا و گوتینگن میزان لیفت نوسانی نشان داده شده و مقایسه صورت گرفته است که بیشترین لیفت برای گوتینگن و کمترین برای ناکا می‌باشد.

برای شبکه‌بندی مدل‌سازی از یک مش بی‌سازمان برای دامنه‌ی حل با ابعاد $300 \times 300 \times 500$ میلی‌متر برای فویلی که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ بیان شده، استفاده شده است. این ابعاد دامنه نسبت به طول فویل انتخاب شده‌اند به گونه‌ای که جریان در پشت و کنار شناور زمان کافی برای نشان دادن خود داشته باشند. میدان سیال دارای مشی است که قابلیت تغییر شکل داشته و با جابجایی جسم صلب شکل و حجم سلول‌ها تغییر می‌کند، در این مدل‌سازی از 6E04 سلول استفاده شده است. فاصله‌ی اولین گره از بدنه‌ی شناور بر اساس y^+ مورد نظر تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر مقدار میانگین y^+ حدود



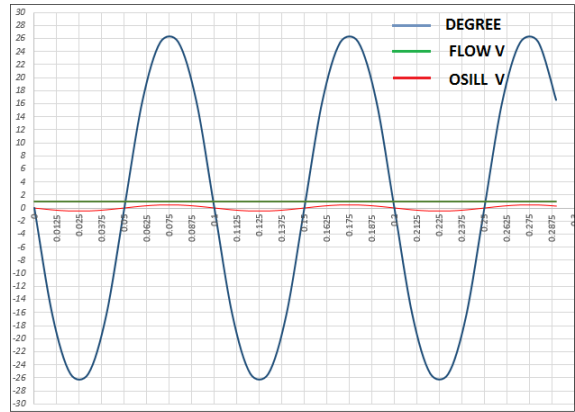
شکل (۱۱): لیفت هیدروفویل گوتینگندر فرکانس‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز نسبت به زمان.

میزان بیشترین لیفت مربوط به گوتینگن با ۱۹ نیوتن و سپس هیدروفویل اپلر با ۱۸ و ناکا با ۱۷ نیوتن می‌باشد. در شکل ۱۲ میزان درگ در زمان نمایش داده شده است. البته، نتیجه‌ی جالب در زمینه‌ی درگ در فرکانس‌های بالاتر دیده می‌شود که تغییر چندانی در اندازه‌ی آن دیده نمی‌شود.

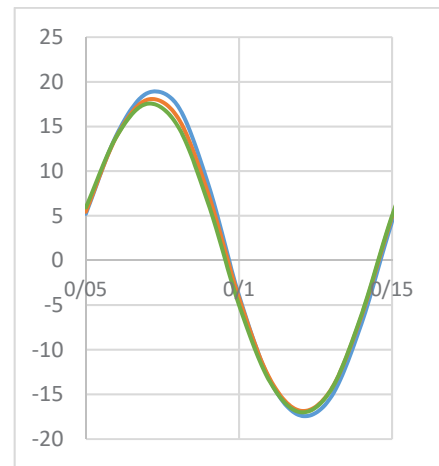


شکل (۱۲): درگ در فرکانس ۱۰ هرتز.

میزان درگ در هیدروفویل گوتینگن بیشترین مقدار می‌باشد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت کارایی هیدروفویل اپلر بهتر از گوتینگن در حالت نوسانی می‌باشد و بدترین شرایط پایداری را فویل ناکا دارا می‌باشد. برای فرکانس‌های بالاتر تغییری در میزان درگ دیده نمی‌شود. اما در فرکانس‌های بالا میزان لیفت کمتر از ۵ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ به ترتیب از سمت چپ به راست بیشترین میزان لیفت در چهار فرکانس ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز نمایش داده شده است.



شکل (۹): تغییرات سرعت نوسانی (رنگ قرمز) و زاویه‌ی سرعت (رنگ آبی) و سرعت جریان (رنگ سبز) در هر لحظه.



شکل ۱۰: لیفت سه هیدروفویل گوتینگن (آبی)، اپلر (قرمز) و ناکا (سبز) در فرکانس ۱۰ هرتز نسبت به زمان.

با توجه به اینکه بیشترین لیفت در هیدروفویل گوتینگن می‌باشد، می‌تواند همین موضوع در فرکانس‌های بالاتر نیز رخ دهد. در ادامه، در سه فرکانس دیگر به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز لیفت گوتینگن در شکل ۱۱ مقایسه شده است که به طور متوسط یک رشد ۴۰ درصدی در فرکانس‌های بالاتر دیده می‌شود.

[5] Wu, T., "Hydromechanics of swimming propulsion," J. Fluid Mech., Vol. 46, pp. 337-355, 1971.

[6] Ohashi, H., and Ishikawa, N., "Visualization study of flow near the trailing edge of an oscillating airfoil," Bull. Jap. Soc. Mech. Engin., Vol. 15, No. 85, pp. 840-847, 1972.

[7] Oshima, Y., and Oshima, K., "flow behind an oscillating foil," in Proceedings of the 15th International Congress, International Union of Theoretical and Applied, Amsterdam: North Holland Publishing Co., pp. 357-368, Mech.1980

[8] Oshima, Y., and Natsume, A., "Flow field around an oscillating foil," in Flow Visualization II, Proceedings of the Second International Symposium on Flow Visualization, Bochum, Germany (ed. W. Merzkirch), New York: Hemisphere Publishing Co., pp. 295-299, 1980.

[9] Freymuth, P., "Propulsive vertical signature of plunging and pitching airfoils", AIAA J. , Vol. 26, pp. 881-883, 1988.

[10] Dickinson, M. H., Lehmann, F. O., and Sane, S. P., "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight," Science, bf 284, pp. 1954-1960, 1999.

[11] <http://m-selig.ae.illinois.edu>

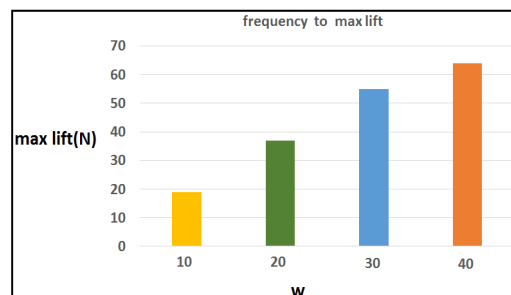
[12] <http://airfoiltools.com/airfoil>

[13] Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model," Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003.

[14] Ferziger, J. H., and Peric, M., "Computational methods for fluid dynamics," Springer, 1999.

[15] Richards, A. J., Oshkai, P., "Effect of the stiffness, inertia and oscillation kinematics on the thrust generation and efficiency of an oscillating-foil propulsion system," Journal of Fluids and Structures, pp. 357-374, 2015.

[16] Cho, H., Zho, Q., "Performance of a flapping foil flow energy harvester in shear flows," Journal of Fluids and Structures, pp. 199-210, 2013.



شکل (۱۳): مقایسه لیفت هیدروفویل Gottingen در چهار فرکانس ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز.

۶- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت فویل نوسانی در مباحث دریایی در کار انجام شده سه نوع هیدروفویل در حال سه‌بعدی به صورت عددی مورد بحث قرار گرفت. در چهار فرکانس ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هرتز میزان درگ و لیفت و توزیع فشار مقایسه شد. میزان درگ در فویل ناکا از بقیه بیشتر بوده و ضریب لیفت به درگ در فویل اپلر بهتر از بقیه بوده است. با اینکه لیفت فویل گوتینگن از همه بیشتر می‌باشد. با افزایش فرکانس تا ۴۰ هرتز میزان درگ افزایش محسوسی نداشته، اما لیفت برای هر سه مورد تا حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. کارایی هیدروفویل اپلر بهتر از گوتینگن در حالت نوسانی می‌باشد و بدترین شرایط پایداری را فویل ناکا دارا می‌باشد.

منابع:

- [1] Mehrabi, M., "Inspired by the swim oscillator foil propulsion mechanism," J. Fluid Mech., Vol. 31, pp 212-230, 2012.
- [2] Lighthill, J., "Mathematical biofluid dynamics," SIAM, Philadelphia, 1975.
- [3] Longvinovich, G. V., "Hydrodynamics of a thin, flexible body," in Hydrodynamic Problems in Bionics, pp. 4-11, Joint Publications Research Service - 52605, Washington, DC, March 1971.
- [4] Wu, T., "Swimming of a waving plate", J. Fluid Mech., Vol. 10, pp. 321-344, 1961.