

شبیه‌سازی عددی نوفه هیدرودینامیکی یک پروانه زیر سطحی به کمک نرم‌افزارهای فلونت و سیس‌نویز

منصور علیزاده
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
ma_alizadeh@iust.ac.ir

سعید خردمند
استادیار دانشکده مکانیک و هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر
kheradmand@mut-es.ac.ir

علی رهروی
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران
ali_rahrovi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲

چکیده

در این مقاله نتایج شبیه‌سازی عددی میدان جریان سیال و نوفه حاصل از آن توسط نرم‌افزارهای فلونت^۱ و سیس‌نویز^۲ در اطراف یک پروانه زیرسطحی نمونه ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا جریان مغشوش غیردائم اطراف پروانه به وسیله روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. در این مرحله، ضرایب هیدرودینامیکی پروانه از حل دینامیک سیالات محاسباتی حاصل می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نمونه، با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است که البته تطابق خوبی مشاهده شد. حل کامل هیدرودینامیکی جریان اطراف این پروانه شامل اطلاعاتی چون میدان فشار و چگالی سیال اطراف پروانه، میدان سرعت، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ استهلاک انرژی اغتشاشی اطراف پروانه است که این نتایج در محاسبه میدان آکوستیکی اطراف پروانه استفاده شده است. پس از کامل شدن محاسبات هیدرودینامیکی پروانه زیرسطحی، به منظور به دست آوردن میدان آکوستیکی جریان اطراف آن، نتایج دینامیک سیالات محاسباتی به دست آمده، در حل‌کننده‌های آکوستیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از دو نرم‌افزار در فواصل دور تطابق نسبی دارند. در فواصل نزدیک گیرنده تا منابع آکوستیک، تراز صوتی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار فلونت دارای مقداری زیاد و غیرواقعی است و مقدار آن با نتایج نرم‌افزار سیس‌نویز تفاوت زیادی دارد. همچنین نتایج نشان‌دهنده توزیع جهتی شدید نوفه است. به شکلی که بیشترین میزان انتشار نوفه در جهت محور هاب پروانه و کمترین میزان انتشار آن در جهت عمود بر محور هاب پروانه است. در ادامه و به منظور تعیین نقش اجزای گوناگون پروانه در ایجاد نوفه، حل معادله طیف‌گسترده انجام شده است. با حل این معادله، مناطقی که سبب تولید بیشترین میزان نوفه روی سطوح پروانه می‌شوند قابل شناسایی است. در نهایت، نتایج حاصل از روش طیف‌گسترده به صورت توزیع ارائه شده و بحث بر مناطق حائز اهمیت در ایجاد نوفه مورد توجه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: پروانه زیرسطحی، شبیه‌سازی عددی، هیدرودینامیک، نوفه تونال

۱. مقدمه

نوفه تولیدی توسط پروانه یک شناور زیرسطحی مهم‌ترین پارامتر در تشخیص شناور به‌وسیله امواج سونار^۳ دشمن است. لذا توانایی اندازه‌گیری این نوفه و کاهش میزان آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌طور کلی، نوفه تولیدی پروانه به دو دسته نوفه کاویتاسیونی و نوفه غیرکاویتاسیونی تقسیم می‌شود [۱]. از منظری دیگر، نوفه پروانه به دو دسته نوفه تونال^۴ و طیف‌گسترده^۵ نیز تقسیم می‌شود [۲]. نوفه تونال مربوط به آثار چرخش پروانه و سرعت دورانی آن است و به‌صورت گسسته حاصل می‌شود، اما نوفه طیف‌گسترده با آثار اندرکنش جریان اغتشاشی و پدیده تولید گردابه در لبه حمله و نوک پروانه ارتباط دارد [۲]. در این مقاله نوفه تونال غیرکاویتاسیونی پروانه بررسی می‌شود. تحلیل هیدرودینامیکی جریان اطراف پروانه پیش‌نیاز تحلیل آکوستیکی آن است. لذا نخست تاریخچه تحلیل هیدرودینامیک جریان اطراف پروانه بررسی می‌شود. در سال ۱۹۹۸ م، چسناکس و جیساپ^۶ روش‌های آزمایشگاهی برای مشاهده جریان اطراف پروانه را گسترش دادند [۳]. این روش‌ها شامل روش سرعت‌سنج لیزر داپلر و روش تصویری سرعت ذره است. اما استفاده از این روش‌ها مستلزم داشتن امکانات آزمایشگاهی پیچیده و صرف هزینه بسیار زیاد است. از جمله دیگر روش‌های تحلیل میدان جریان اطراف پروانه می‌توان به روش تحلیل جریان پتانسیل غیرلزج اشاره کرد. این روش براساس مدل شبکه گردابه^۷ استوار و هنوز هم در بین مدل‌سازان جریان پروانه مشهور است [۴]. طی سالیان گذشته، روش‌های تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی براساس معادلات ناویه استوکس متوسط‌گیری رینولدز شده^۸ درمورد بسیاری از پروانه‌ها با هندسه‌های گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است. جریان گردابه نوک پره و هاب نیز به‌وسیله روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. در مرجع ۶، مدل‌های اغتشاشی بالدوین - لوماکس^۹، $K - \omega$ و تنش رینولدز^{۱۰} برای جریان گردابه روی لبه پره

پروانه بررسی شده است. در این مقاله نشان داده می‌شود که مدل بالدوین - لوماکس توانایی مدل‌کردن دقیق جریان اطراف پروانه را ندارد و مدل‌های $K - \omega$ و تنش رینولدز جریان چرخشی اطراف پروانه را بهتر مدل می‌کنند. در سال ۲۰۰۵، هی و جاشی^{۱۱} با استفاده از یک کد تجاری جریان حول یک پروانه مدرن پنج‌تیغه با اسکيو^{۱۲} بالا را شبیه‌سازی کردند [۷]. محاسبات آنها با استفاده از چارچوب مرجع متحرک^{۱۳} انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها برای حالت آب‌باز در دامنه وسیعی از ضرایب پیشروی (نسبت جریان آزاد به سرعت نوک تیغه) انجام شده است. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه مقایسه بین شبکه بی‌سازمان و شبکه سازمان‌یافته برای بررسی جریان حول پروانه‌های دریایی در شرایط کاری جریان یکنواخت انجام شده است [۸]. با بررسی تاریخچه تحقیقات انجام‌شده در زمینه نوفه هیدرودینامیکی پروانه موارد زیر استخراج می‌گردد. در مرجع ۹ از یک رابطه نیمه‌تجربی برای محاسبه نوفه طیف‌گسترده پروانه استفاده شده است. همچنین در این مقاله از روش آکوستیکی خاصی برای محاسبه نوفه تونال پروانه استفاده شده است. تحقیق دیگری با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به محاسبه نوفه پروانه‌های کم‌نوفه پرداخته است [۱۰]. در این تحقیق یک رابطه نیمه‌تجربی برای محاسبه نوفه پروانه در فرکانس‌های پایین مورد استفاده قرار گرفته است. از طرف دیگر سول و همکاران^{۱۴} به شبیه‌سازی عددی نوفه حاصل از یک پروانه زیرسطحی در حالت کاویتاسیونی و غیرکاویتاسیونی پرداخته‌اند [۱۱]. در این تحقیق، جریان هیدرودینامیکی سیال به‌وسیله روش پتل محاسبه شده و این نتایج به‌منظور استفاده در رابطه فاکس ویلیام - هاوکینگ^{۱۵} برای محاسبه میدان آکوستیکی در دوردست جریان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی پارامترهای مؤثر در میدان جریان لزج اطراف پروانه محاسبه شده است. میدان گردابی جریان مشخص شده و در ادامه، این پارامترها معیار محاسبه میدان

نقطه گیرنده در فضا و Y مختصات نقطه فرستنده صوت روی صفحه است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_i) = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} [(P_{ij} + \rho u_i (u_n - v_n)) \delta(f)] \\ \times \frac{1}{a_0^2} \times \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \\ = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] + \\ + \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)) \delta(f)] \quad (3)$$

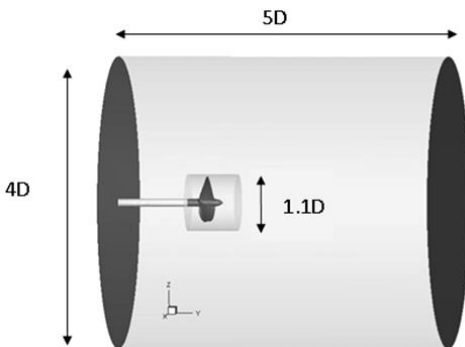
$$p(X) = [a]^t \{p\} - [b]^t \{v\} \quad (4)$$

$$a_{mj}^\beta = \int_{S_m} N_\beta(\xi) \frac{\partial G(X_j, Y)}{\partial n} J(\xi) d\xi \quad (5)$$

$$b_{mj}^\beta = \int_{S_m} N_\beta(\xi) G(X_j, Y(\xi)) J(\xi) d\xi \quad (6)$$

$$G(X, Y) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}, \quad r = |X - Y| \quad (7)$$

حل عددی معادلات هیدرودینامیکی با روش حجم محدود انجام شده است. در شکل ۱ دامنه محاسباتی استوانه‌ای شکل جریان اطراف پروانه و محل دو هیدروفن نمونه مشاهده می‌شود.



شکل ۱. میدان محاسباتی جریان

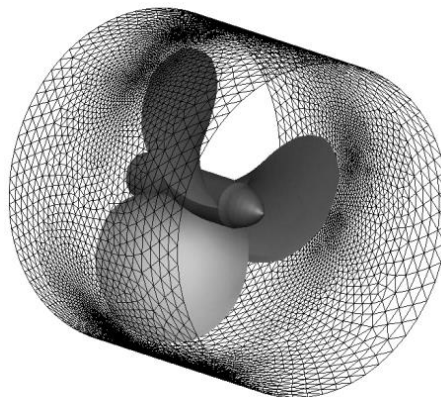
آکوستیکی میدان دوردست پروانه قرار گرفته است. قابل ذکر است که مدل اغتشاشی مورد استفاده در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^{۱۶} می‌باشد. این مدل قادر است، به دلیل دارا بودن شبکه‌بندی بسیار ریز، فشار آکوستیکی را - که در مقایسه با فشار استاتیکی بسیار کوچکتر است - مدل کند.

۲. معادلات حاکم و مشخصات شبیه‌سازی عددی

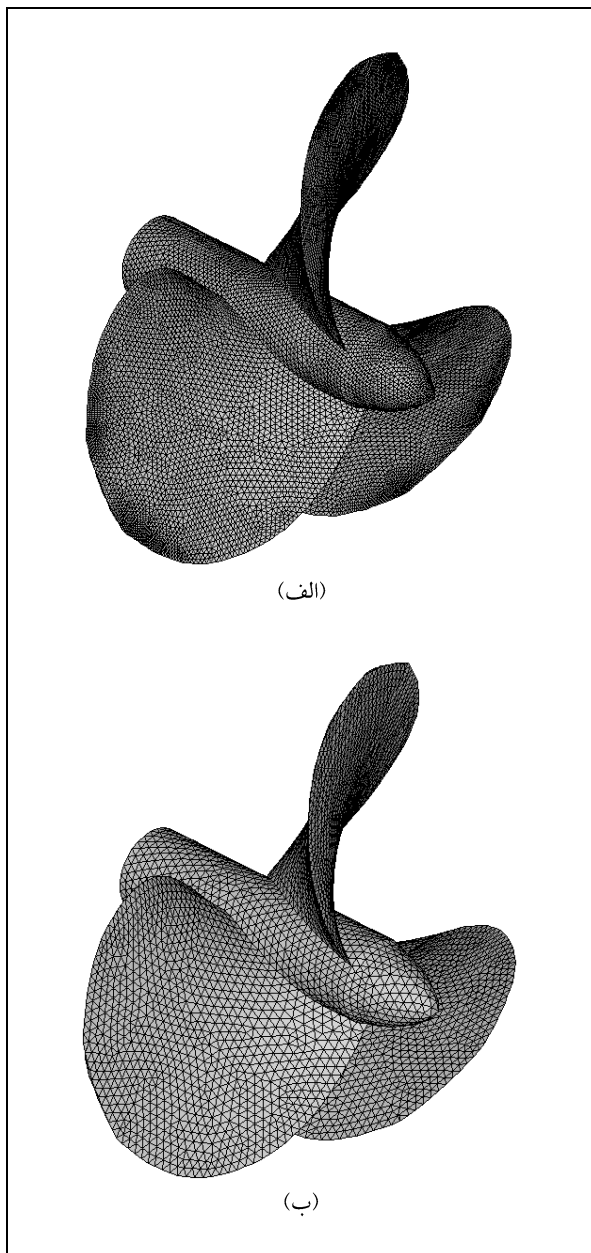
در تحلیل هیدرودینامیکی جریان دو معادله پیوستگی و اندازه حرکت حاکم بر حرکت سیال می‌باشند. این معادلات به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند. به طوری که در این روابط ρ چگالی آب، u_i مؤلفه‌های سرعت آب، P فشار و τ_{ij} تنش‌های برشی می‌باشند. در این مقاله برای تحلیل آکوستیکی پروانه، از پروانه آزمایشگاهی زیرسطحی DTMB4119 استفاده شده است.

نرم‌افزار فلونت از فرمول فاکس ویلیام - هاو کینگ برای محاسبه نوفه در دوردست استفاده می‌کند که در رابطه ۳ معرفی شده است. در این رابطه u_i مؤلفه سرعت سیال در راستای x_i است. u_n مؤلفه سرعت سیال در راستای عمود بر سطح $f=0$ است. همچنین v_n مؤلفه سرعت سطح در راستای عمود بر سطح است. $\delta(f)$ نیز تابع دلتای دیراک^{۱۷} و $H(f)$ تابع هویساید^{۱۸} است. a_0 سرعت صوت در سیال است و p' فشار آکوستیکی، T_{ij} تانسور تنش لایت‌هیل^{۱۹} و P_{ij} تانسور تنش تراکم‌پذیری^{۲۰} است. همچنین نرم‌افزار سیسن‌نویز از روش المان مرزی برای پیش‌بینی نویز ایجاد شده استفاده می‌کند. به طوری که در این رابطه، p فشار، v سرعت عمودی سطح می‌باشند. ماتریس‌های a و b به صورت روابط ۵ و ۶ تعریف می‌شوند. در این روابط β شماره محلی هر گره در المان m ، ξ مختصات محلی، $N_\beta(\xi)$ تابع شکل المان، $J(\xi)$ ژاکوبین ماتریس تبدیل مختصات به مختصات محلی و $G(X, Y)$ جواب اساسی معادله هلمهولتز به صورت رابطه ۷ می‌باشد. به طوری که در رابطه ۷، X مختصات

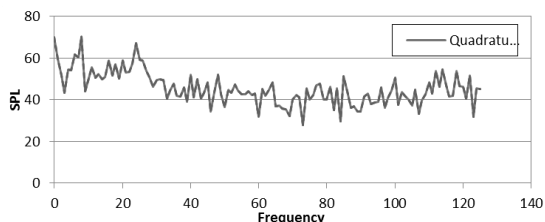
در این شکل استوانه کوچکی به قطر $1/10D$ اطراف پروانه است که برای مدل کردن چرخش پروانه به روش مرجع چرخان استفاده می‌شود. شبکه محاسباتی این قسمت در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. شبکه محاسباتی مرجع چرخان



شکل ۳. نمایشی از (الف) شبکه مورد استفاده در حل دینامیک محاسباتی، (ب) شبکه مورد استفاده در تحلیل آکوستیکی



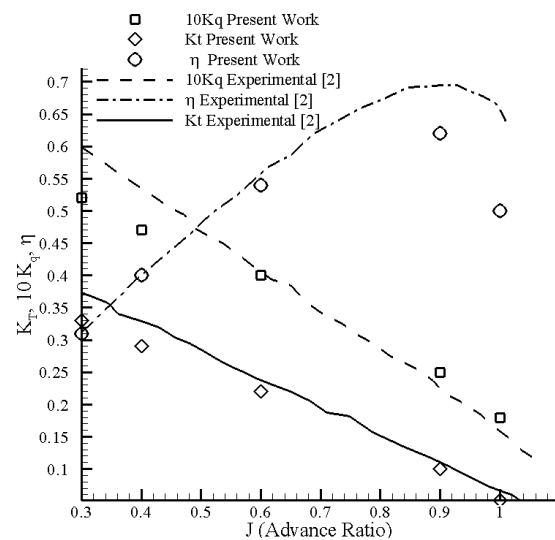
شکل ۴. اثر مرتبه انتگرال گیری روی جواب‌های به دست آمده از نرم افزار سیس نويز

قابل ذکر است که ابتدا حل جریان دائم به روش تنش رینولدز انجام می‌شود، سپس این نتایج به عنوان شرایط اولیه برای حل غیردائم جریان با مدل اغتشاشی گردابه‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از حل هیدرودینامیک منابع مورد نیاز برای حل آکوستیکی محاسبه می‌شوند. با توجه به توانایی نرم افزار سیس نويز برای استفاده از شبکه‌های متفاوت از شبکه مورد استفاده در حل هیدرودینامیک و همچنین ریزبودن بیش از حد شبکه حل هیدرودینامیک و عدم ضرورت استفاده از چنین شبکه ریزی برای بررسی فرکانس‌های مورد بررسی، این منابع روی شبکه‌ای درشت تر میان‌یابی می‌شوند. شکل ۳ شبکه مورد استفاده در حل آکوستیکی در نرم افزار سیس نويز را در کنار شبکه حل دینامیک محاسباتی سیالات نشان می‌دهد. همچنین برای اطمینان از استقلال جواب‌ها از دقت انتگرال گیری در انتگرال‌های ۵ و ۶، نوفه حاصل در نقطه قبلی با استفاده از دو روش انتگرال گیری کوادرچر^{۲۱} مرتبه دوم و چهارم محاسبه و در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است جواب‌های به دست آمده کاملاً بر هم منطبق‌اند.

۳. نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱. نتایج هیدرودینامیکی

با توجه به اینکه دقت حل آکوستیک به حل هیدرودینامیک جریان وابسته است، ابتدا درستی نتایج حل عددی جریان حول پروانه مورد توجه قرار می‌گیرد. در شکل ۵ نمودار مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی برحسب ضریب پیشروی^{۲۲} برای دو حالت کار عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی [۲] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج با یکدیگر تطابق نسبتاً قابل قبولی دارند. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود، مقادیر ضرایب پیشرانش و گشتاور به ازای تمامی ضرایب پیشروی به یکدیگر نزدیک‌اند و حداکثر اختلاف آنها ۷ درصد است، در حالی که در مورد بازدهی پروانه، نتایج کار عددی حاضر نسبت به نتایج آزمایشگاهی ۸ درصد انحراف پیدا می‌کند که این انحراف در ضریب پیشروی ۰/۹ اتفاق می‌افتد.



شکل ۵. نمودار عملکرد هیدرودینامیکی پروانه DTMB4119

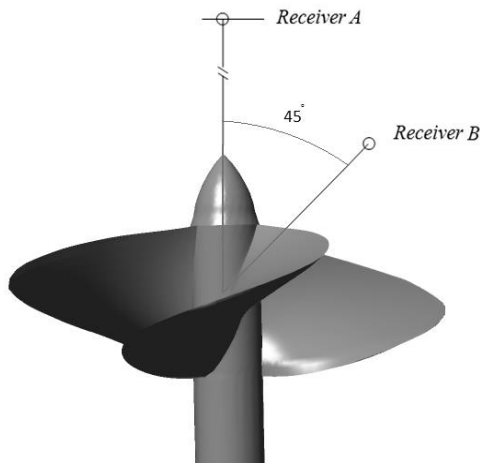
نکته قابل تأمل دیگر اینکه مقدار بازدهی پروانه به ازای ضریب پیشروی معادل ۰/۹، چه در نتایج آزمایشگاهی و چه در نتایج عددی، بیشینه است و این موضوع نشان‌دهنده این است که بهترین شرایط عملکرد هیدرودینامیکی این پروانه به ازای ضریب پیشروی معادل ۰/۹ است. قابل ذکر است که مقادیر ضریب پیشروی از رابطه ۸ به دست می‌آید [۹].

$$J = \frac{V_s}{N_p D_p} \quad (۸)$$

به طوری که در این رابطه V_s سرعت پیشروی سیال، N_p دور پروانه برحسب دور بر ثانیه و نهایتاً D_p قطر پروانه برحسب متر است.

۳-۲. نتایج آکوستیک

برای مقایسه نوفه تولیدی از پروانه، دو هیدروفن به صورت هیدروفن‌های نمایش داده شده در شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود. هیدروفن A در فاصله ۱/۵۲۴ متری روی محور چرخش پروانه و هیدروفن B در فاصله ۰/۲ متری و در زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت‌های شعاعی و محوری قرار دارد.

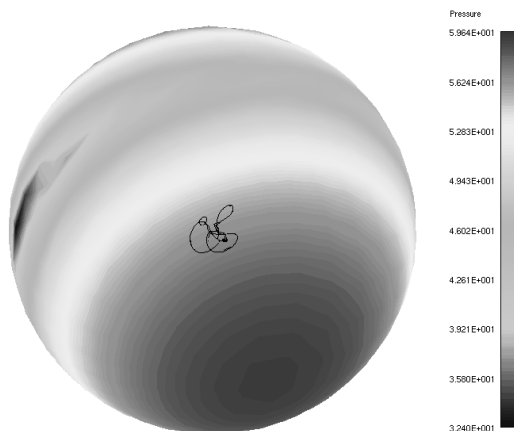


شکل ۶. مکان هیدروفن‌های مورد بررسی

شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه‌ای بین طیف فرکانسی نوفه محاسبه شده توسط نرم‌افزار سیس‌نویز و فلونت در هیدروفن‌های مورد نظر را نمایش می‌دهند. قابل ذکر است که چگالی آب و سرعت صوت به ترتیب ۱۰۲۶ کیلوگرم بر متر مکعب و ۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین برای محاسبه میزان تراز نوفه از رابطه ۹ استفاده می‌شود [۹].

$$SPL = 20 \times \log \frac{P_{acoustic}}{P_{ref}} \quad (۹)$$

فواصل نزدیک، که این فرض برقرار نمی‌باشد، نتایج غیرواقعی به دست می‌آیند. شکل ۹ نمودار سه‌بعدی میزان شدت نوفه محاسبه شده توسط نرم‌افزار سیس‌نویز برحسب دسی‌بل در فرکانس ۶ هرتز (فرکانس عبور پره^۴) روی محیط کره‌ای به مرکز پروانه و شعاع ۵ برابر قطر پروانه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از توزیع تراز صوتی در شکل ۹ مشخص است، توزیع نوفه به شدت به جهت انتشار آن بستگی دارد.



شکل ۹. تراز صوتی ناشی از پروانه برحسب دسی‌بل

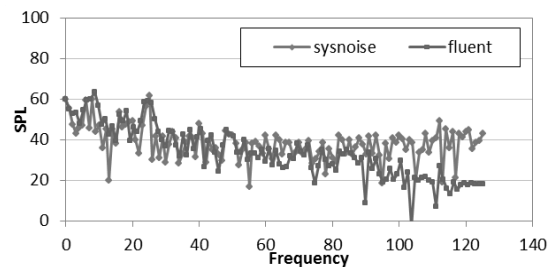
در کره‌ای به شعاع ۱ متر در اطراف پروانه در فرکانس ۶۰ هرتز

میزان شدت نوفه روی محور هاب پروانه بیشتر از این میزان در جهت عمود بر محور هاب پروانه (صفحه چرخش پروانه) است. با توجه به اینکه جهت توزیع نوفه‌های بارگذاری در جهت محور هاب و جهت توزیع نوفه‌های ضخامتی در جهت عمود بر محور است، می‌توان نتیجه گرفت که در نوفه غیرکاویتاسیونی تأثیر نوفه‌های بارگذاری بیشتر است.

۴. نوفه طیف گسترده در پروانه

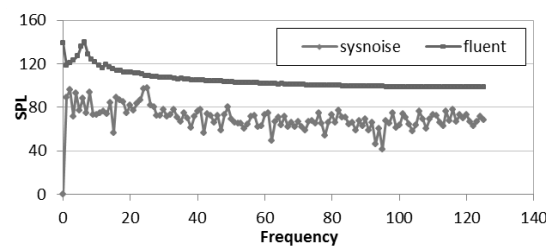
رابطه^{۱۰}، که به رابطه پرودمن^{۲۵} مشهور است، برای محاسبه توان آکوستیکی یک جریان آشفته بدون جریان متوسط ارائه می‌شود. به طوری که در این رابطه u و l به ترتیب سرعت مشخصه متلاطم و طول مشخصه هستند. a_0 سرعت صوت، α ضریبی ثابت و I_A توان آکوستیکی

به طوری که در این رابطه SPL^{۳۳} معرف تراز فشار صدا برحسب دسی بل می‌باشد. شایان ذکر است که اندازه فشار برابر است با $p_{ref} = 10^{-6} \text{ pa}$. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج پیش‌بینی شده توسط دو نرم‌افزار از تطابق نسبی برخوردارند، با این حال در فرکانس‌های بالا نرم‌افزار سیس‌نویز تراز صوتی بالاتری را نسبت به فلونت پیش‌بینی می‌کند. شکل ۸ مقایسه بین نوفه محاسبه شده در هیدروفن B توسط دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه تراز صوتی نوفه به دست آمده

از نرم‌افزارهای سیس‌نویز و فلونت در هیدروفن A



شکل ۸. مقایسه نوفه به دست آمده

از نرم‌افزارهای سیس‌نویز و فلونت در هیدروفن B

همان‌طور که در این شکل مشخص است، با نزدیک شدن فاصله گیرنده از منابع نوفه، نرم‌افزار فلونت تراز صوتی مقدار غیرواقعی و بسیار زیاد ۱۴۰ دسی‌بل را پیش‌بینی می‌نماید. علت این امر را می‌توان در فرمول به کار برده شده توسط فلونت برای پیش‌بینی نوفه جست‌وجو کرد. همان‌طور که اشاره شد، فلونت از فرمول‌بندی فاکس و بلیام - هاوکینگ برای محاسبه نوفه استفاده می‌کند که در این فرمول‌بندی با فرض فاصله زیاد گیرنده از منابع صوت، مشتق‌های مکانی به زمانی تبدیل می‌شوند و بنابراین در

بسیاری تولید و اختلاف فشار استاتیکی زیادی ایجاد می‌شود. در نتیجه مقدار نوفه تولیدی بیشینه است.

۵. نتیجه‌گیری

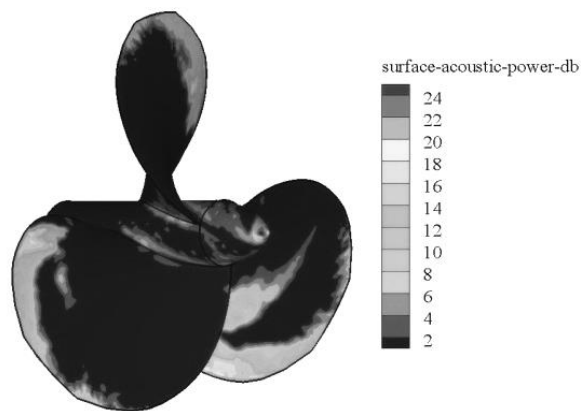
در این مقاله، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان سیال و نوفه یک پروانه زیرسطحی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد. نتایج هیدرودینامیکی در مقایسه با سایر تحلیل‌ها بررسی و درستی‌سنجی شد. با استفاده از نتایج هیدرودینامیک به دست آمده، تحلیل آکوستیک توسط دو نرم‌افزار سیس‌نویز و فلونت انجام و تراز صوتی به دست آمده با هم مقایسه شد. نتایج به دست آمده از دو نرم‌افزار تطابق قابل قبولی را در فواصل دور از صفحات منابع نوفه با یکدیگر دارند. با این حال با نزدیک شدن نقاط گیرنده به منابع نوفه، نرم‌افزار فلونت، تراز صوتی غیرواقعی و شدیدی را محاسبه می‌نماید، در حالی که نتایج به دست آمده از نرم‌افزار سیس‌نویز در بازه قابل قبولی است. دلیل این امر، استفاده فلونت از فرمول فاکس ویلیام - هاوکینگ و فرض فاصله زیاد نقاط گیرنده نوفه تا منابع در این عبارت می‌باشد. با توجه به نتایج آکوستیکی ملاحظه می‌شود که توزیع میزان شدت نوفه به شدت به جهت انتشار آن وابسته است، به گونه‌ای که بیشترین میزان نوفه در محور هاب پروانه و کمترین میزان نوفه، عمود بر محور هاب و در صفحه چرخش آن است. در بررسی نوفه طیف‌گسترده روی سطوح پروانه است. با توجه به نمودار توان آکوستیکی روی سطوح پروانه، مناطقی چون لبه حمله پره و هاب، به دلیل تولید گردابه در جریان اطراف پروانه، سبب ایجاد بیشترین نوفه تولیدی در سطوح آن می‌شوند. با بررسی این نتایج می‌توان به این نکته دست یافت که در مناطقی که تغییرات هندسی زیاد است، نوفه هیدرودینامیکی تولیدی بیشینه خواهد بود.

است. از طرف دیگر، تراز توان آکوستیکی برحسب دسی‌بل روی سطوح پروانه با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$I_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{a_0^5} \quad (10)$$

$$L_p = 10 \times \log \left(\frac{I_A}{I_{ref}} \right) \quad (11)$$

به طوری که در این رابطه I_{ref} توان آکوستیکی مرجع است و برابر است با 10^{-12} وات بر متر مکعب. رابطه پرودمن مقدار توان آکوستیکی را به صورت محلی در جریان آشفتنه مشخص می‌کند. در حل طیف‌گسترده به استفاده از حل غیردائم جریان نیاز نیست و استفاده از حل دائم کفایت می‌کند. شکل ۱۰ نمودار طیف‌گسترده نوفه روی پروانه را برحسب دسی‌بل نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰. توزیع توان آکوستیکی روی سطح پروانه در حالت سرعت پیشروی ۱/۶ متر بر ثانیه و سرعت پروانه ۱۲۰ دور بر دقیقه

همان‌طور که از توزیع قدرت آکوستیکی روی سطح فشار پروانه مشخص است، بیشینه منابع تولید نوفه در لبه‌های حمله، محل اتصال پره‌ها به هاب و نوک هاب قرار دارد و این به دلیل تولید گردابه از لبه حمله پره و هاب پروانه است. در مناطقی که تغییر هندسی بسیار زیاد است، گردابه

۶. مأخذ

- [1] Seol, H., J. C. Such and S. Lee. "Development of Hybrid Method for Prediction of Underwater Propeller Noise." *Journal of Sound and Vibration*, vol. 288, (2005):345-360.

- [2] Pan, Y., H. Zhang. "Numerical Hydro-Acoustic Prediction of Marine Propeller Noise." *Journal of Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 15, No. 6, (2010):707-712.
- [3] Chesnakas C., S. Jessup, Experimental Characterization of Propeller Tip Flow, *Proc. 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington DC: 1998.
- [4] Kerwin, J., C. S. Lee. "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory." *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 88, 1978.
- [5] Funeno, I., J. Kosai. "On Viscous Flow around Marine Propeller-Hub Vortex and Scale Effect." *Society of Naval Architects of Japan*, vol. 238, (2002):17-27.
- [6] Chen, B., B. Rans. "Simulation of Tip Vortex Flow for a Finite-Span Hydrofoil and a Marine Propulsors." PhD diss., University of Iowa: 2000.
- [7] Rhee, S. H., S. Joshi. "Computational validation for flow around a marine propeller using unstructured mesh based Navier-Stokes solver." *JSME International Journal Series B*, vol. 48, 2005.
- [8] Morgut, Mitja, Enrico Nobile. "Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow around Marine Propellers." *First International Symposium on Marine Propulsors smp'09*, Trondheim, Norway, 2009.
- [9] Okamura, N, T. Asano. "Prediction of Propeller Cavitation Noise and Its Comparison with Full Scale Measurements." *Journal of Naval Architects of Japan*, vol. 164, (1988):19-33.
- [10] Ekinici, S., M. A. Guner. *Practical Noise Prediction Method for Cavitating Marine Propellers*, 2010.
- [11] Carlton, J., *Marine Propeller and Propulsion*, 2nd edition, London: Butterworth-Heinemann, 1994.

پی نوشت

- | | |
|--|--|
| <p>1. Fluent[®]</p> <p>2. Sysnoise[®]</p> <p>۳. سونار دستگاه ردیاب زیردریایی است که طرز کار آن استفاده از انتشار امواج صوتی است. علاوه بر ردیابی، این روش معمولاً به منظور ناوبری و ارتباط با دیگر یگان‌های شناور و زیرآبی نیز استفاده می‌شود [ویراستار].</p> <p>4. Tonal</p> <p>5. broad band</p> <p>6. Chesnakas and Jessup</p> <p>7. lifting surface vortex lattice</p> <p>8. RANS</p> <p>9. Baldwin-Lomax</p> <p>10. RSM</p> <p>11. Rhee and Joshi</p> <p>12. skew</p> <p>13. moving reference frame</p> | <p>14. Seol and etal.</p> <p>15. Fowcs-Wiliam-Hawkings (FW-H)</p> <p>16. large eddy simulation (LES)</p> <p>17. Dirac Delta function</p> <p>18. Heaviside function</p> <p>19. Lighthill stress tensor</p> <p>20. compressive stress tensor</p> <p>21. Quadrature</p> <p>22. advance ratio</p> <p>23. sound pressure level</p> <p>24. blade passing frequency</p> <p>25. Proudman</p> |
|--|--|