

بررسی عددی عملکرد یک پروانه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

در این مقاله هدف بدست آوردن منحنی های عملکرد پروانه با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت می باشد. میدان جریان سیال لزج، تراکم ناپذیر و دوفازی می باشد. منحنی های مشخصه عملکرد یک پروانه سری بی - وگننگن برای مقادیر مختلف ضریب پیشروی (J) و برای عمق های مختلف بررسی شده است. برای مدل سازی جریان مغشوش و شبیه سازی حرکت سطح آزاد به ترتیب از مدل $k-\omega SST$ و روش حجم سیال استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج حل عددی با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی پروانه در نزدیک سطح حل عددی در شرایط آب آزاد انجام شده و ضریب های عملکردی پروانه محاسبه شده اند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل سازی دائم به روش معادلات متوسط گیری شده رینولدز برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی مناسب بوده و با هزینه محاسباتی کمتر و دقت مناسب نسبت به روش غیردائم نتایج را پیش بینی می کنند. از طرف دیگر در عمق ثابت با افزایش ضریب پیشروی میزان نیرو و ضرایب تراست و گشتاور کاهش یافته است.

امیر حسین نگهی^۱
کارشناسی ارشد

سید امیر عباس
علمی^۲
استادیار

واژه های راهنما: بررسی عددی، پروانه، عملکرد پروانه، روش حجم سیال، دینامیک سیالات محاسباتی

۱- مقدمه

لازمه حرکت شناور در یک سرعت معین اعمال نیرویی می باشد که بر مقاومت هیدرودینامیکی سیال آب غلبه کند. این نیرو به وسیله سیستم پیش رانش شناور تولید می شود. متداول ترین سیستم پیش برنده دریایی سیستم پروانه ای است. بر اساس نوع و رژیم حرکتی شناورهای سطحی و زیرسطحی، پروانه می تواند در فواصل مختلف از سطح آب قرار گیرد. بازده سیستم رانش یک شناور وابستگی شدید به عملکرد پروانه آن خواهد داشت. لذا بررسی نیروی تراست و گشتاور ایجاد شده توسط پروانه و راندمان آن می تواند نقش

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران Amir_ne69@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Amiroloomi@iauyazd.ac.ir

بسزایی در طراحی سیستم رانش داشته باشد. از اینرو ساده‌ترین روش جهت ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های دریایی، محاسبه و رسم منحنی‌های عملکرد پروانه برحسب ضریب پیشروی می‌باشد. جهت طراحی و ترسیم منحنی‌های فوق می‌توان از روش‌های متعددی بهره گرفت از جمله روش تست مدل، در این روش مدل پروانه مورد نظر با یک مقیاس مشخص از اندازه واقعی ساخته می‌شود. سپس بر روی مدل مذکور تست‌های مورد نیاز برای رسم منحنی‌های عملکرد انجام می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با مدل سازی جریان اطراف پروانه صورت گرفته است [۱،۲]. در مرجع [۱] با استفاده از نرم افزار انسیس فلونتت جریان حول دو پروانه دریایی چهار پره ای و پنج پره ای در حالت کاویتاسیون دایمی و گذرا شبیه سازی شده است. برای این منظور جریان یکنواخت و جریان ویک به عنوان ورودی دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده و ضریب‌های پیش رانش و گشتاور پیچشی محاسبه شده است. دقت مناسب نتایج محاسباتی در مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهد که از روش به کار گرفته شده در این مرجع می‌توان برای شبیه سازی رفتار جریان در انواع پروانه‌ها استفاده نمود. در مرجع [۲] تحلیل عددی یک نمونه پروانه سری بی - وگنینگن در شرایط آب آزاد به وسیله نرم افزار فلونتت شرح داده شده و همچنین اثر تراکم شبکه نوع مدل آشفتگی و الگوریتم حل عددی بر روی دقت ضریب‌های عملکردی محاسباتی در مقایسه با نتایج تجربی بررسی شده است. از نتایج آرایه شده در این مرجع می‌توان در شبیه سازی عددی، شبکه بندی میدان جریان، انتخاب مدل آشفتگی پروانه‌ها استفاده نمود.

یکی از پدیده‌هایی که می‌تواند در حین کارکرد پروانه در نزدیک سطح بوجود آید پدیده هوادهی ناشی از مکش هوا توسط پروانه می‌باشد. این پدیده در اثر تماس سطح تیغه‌های پروانه با اتمسفر و یا ایجاد حفره متصل کننده هوا از بالای سطح به پروانه در اثر کارکرد پروانه در نزدیک سطح ایجاد می‌شود. وقوع این پدیده بر همگرایی و در نتیجه پیچیدگی حل جریان می‌افزاید و همچنین به علت عدم پایداری و تغییرات ناگهانی در نیروی پیش رانش و گشتاور پیچشی و در نتیجه افزایش ناگهانی سرعت دورانی باعث آسیب جدی قطعات مکانیکی و اجزای موتور می‌شود.

در چند دهه اخیر محققان زیادی پدیده هوادهی در پروانه‌ها را بصورت تجربی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار داده اند. اغلب این تحقیقات در جهت شناخت بهتر مکانیزم تهویه و بررسی تاثیر این پدیده بر عملکرد پروانه‌ها متمرکز بوده است. فال تینسن [۳] در سال ۱۹۸۱ نتایج حاصل از اثر تهویه پروانه بر روی متوسط مقادیر نیروی پیش رانش و گشتاور پیچشی در حین عملکرد بر روی امواج را آرایه نمود.

یانگ و کیناس [۴] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش المان مرزی و کاپوننتتو [۵] با استفاده از متوسط گیری معادلات ناویر- استوکس در سال ۲۰۰۳ نتایج حاصل از محاسبه بارهای دینامیکی اعمالی بر پروانه‌های نیمه مغروقی که توسط الوفسون [۶] در سال ۱۹۹۶ مورد آزمایش قرار گرفته شده بود را آرایه نمودند مقایسه نتایج محاسباتی با تجربی نشان دهنده تطابق خوب داده‌های محاسباتی با تجربی می‌باشد. جهت درک بهتر از پدیده هوادهی و بررسی تاثیر آن بر نیروی پیش رانش پروانه، کوشان [۷] در سال ۲۰۰۶ اقدام به یک سری آزمایش بر روی یک پروانه در وضعیت‌های متفاوت قرارگیری نسبت به سطح آب نمود.

¹B-Wageningen

²Aeration

نتایج حاصل از این تحقیق مورد استفاده بعضی از محققین قرار گرفت، از جمله کالیفانو و استین [۸] در سال ۲۰۰۹ با تحلیل عددی مکانیزم هوادهی پروانه‌های مورد آزمایش کوشان را بوسیله نرم افزار فلوئنت بررسی کردند. آنان برای شبیه سازی عددی از مدل جریان آرام، غیر قابل تراکم و دو فاز و جهت مدل نمودن چرخش پروانه از هر دو روش دستگاه مرجع چرخان و شبکه‌های لغزان استفاده نمودند. از نتایج این تحقیق می‌توان به بارهای اعمالی بر روی تیغه‌های پروانه در حین وقوع پدیده هوادهی (در نسبت غوطه وری (h/R)) و نسبت پیشروی ($J = \frac{u}{n.D} = 0.1$) اشاره نمود.

از میان محققانی که با استفاده از روش عددی بر روی پروانه‌ی نیمه مغروق کار کرده‌اند. برخی در رساله دکتری خویش تحلیل عددی پروانه‌های سوپر کاویتاسیونی و نیمه مغروق را مورد تحلیل و بررسی قرار داده و نتایج مناسبی از توزیع فشار و ضرایب هیدرودینامیکی به دست آورده‌اند [۹]. در روسیه نیز تحقیقات گسترده‌ای در مورد پروانه‌های نیمه مغروق انجام شده است از آن جمله در سال (۲۰۰۷) برای یک پروانه‌ی نیمه مغروق ۵ پره نتایج عددی و تجربی ارائه کرده‌اند [۱۰]. علت پیچیدگی حل میدان جریان حول پروانه در نزدیک سطح اغلب تحلیل‌های عددی انجام شده با در نظر گرفتن فرضیاتی جهت ساده سازی همراه بود و بخش محدودی از عملکرد پروانه را شامل می‌شود. مطالعه فعالیت‌های در دسترس موجود نشان می‌دهد که فعالیت‌های کمی به ویژه در حوزه شبیه سازی عددی پروانه در نزدیکی سطح آزاد مایع صورت پذیرفته است. لذا در این تحقیق بررسی اثر سطح آزاد بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه پرداخته شده است. علاوه بر آن مشخصه‌های عملکردی پروانه در نسبت پیش روی متفاوت و تاثیر پدیده هوادهی ناشی از افزایش سرعت چرخش پروانه بر روی ضریب‌های عملکرد پروانه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی، تراکم ناپذیر، مغشوش، دو فاز و با در نظر گرفتن پروانه انجام شده است که با در نظر گرفتن تعداد حالت‌های بالای شبیه سازی بسیار زمان بر می‌باشد. حل میدان جریان با استفاده از کد محاسباتی در دسترس موجود، نرم افزار انسیس- فلوئنت انجام شده است.

۲- معادلات حاکم و روش عددی

با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر جریان سیال معادلات ناویر- استوکس طبق رابطه (۱) قابل ارایه می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(۱)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i$$

در این معادلات u مولفه سرعت، p فشار، ρ چگالی، μ لزجت و g_i مولفه گرانش می‌باشد. لازم به ذکر است که در مرجع [۲] اثر نوع مدل آشفتگی بر دقت محاسبه ضریب عملکرد پروانه بررسی شده است. مقایسه نتایج حاصله با نتایج تجربی نشان دهند برتری مدل $k-\epsilon$ نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی بوده است. علاوه بر آن با توجه به قابلیت این مدل در حل مسایل چند فاز [۱۱] در این تحقیق برای حل

مسئله از این مدل استفاده شده است. این مدل جریان آشفته براساس دو مفهوم انرژی جنبشی جریان آشفته (k) و نرخ اتلاف ویژه (ω) می باشد که معادلات آن طبق روابط (۲) و (۳) ارائه می شوند [۱۲].

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \overline{G_K} - Y_K + S_k \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho K)}{\partial t} \quad (2)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \quad (3)$$

در این روابط G_ω و $\overline{G_K}$ نشان دهنده ترم تولید در معادلات K و ω ، Γ_k و Γ_ω نشان دهنده پخش موثر K و ω ، Y_ω و Y_K اتلاف ناشی از جریان آشفته، D_ω نشان دهنده پارامتر پخش عرضی و S_K و S_ω ترم های چشمه تعریف شده توسط کاربر می باشند.

با توجه به لزوم در نظر گرفتن تاثیر هم زمان جریان آب در زیر سطح آزاد و جریان هوا در بالای آن از روش حجم سیال (VOF) که توسط هیرت و نیکولز [۱۳] در سال (۱۹۸۱) ارائه شده برای مدل سازی جریان دوفازی استفاده شده است. در روش حجم سیال در محل تماس دو فاز معادله پیوستگی نسبت حجمی برای یک فاز یا هر دو فاز حل می شود. اگر تعداد فازها q باشد این معادله عبارت است از:

$$+\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{aq} \quad (4)$$

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_{aq} نیز ترم چشمه می باشد که در این تحقیق مقدار آن صفر است. α_q بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز q و \vec{v}_q بردار سرعت فاز q می باشد.

برای مدل سازی حرکت چرخشی در مدل سازی ناحیه دوار و وارد کردن اثرات شتاب کوریولیس در معادلات حاکم از روش دستگاه مرجع چرخان و روش شبکه های لغزان موجود در نرم افزار فلونت استفاده شده است [۱۴] زمانیکه معادلات حرکت برای حالت دستگاه مرجع در حالت چرخش حل می شود، جمله شتاب در معادلات تکانه ظاهر می شود. نرم افزار فلونت مسائل دستگاه مرجع چرخان را با در نظر گرفتن سرعت مطلق \vec{u} و سرعت نسبی \vec{u}_r که وابسته به هم هستند مدل می کند (رابطه ۵).

$$\vec{u}_r = \vec{u} - \vec{\Omega} \times \vec{r} \quad (5)$$

در این رابطه $\vec{\Omega}$ بردار سرعت زاویه ای و \vec{r} بردار موقعیت در دستگاه چرخشی است. سمت چپ معادلات تکانه در رابطه (۶) آورده شده است.

$$+\vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{u} \cdot \vec{u}) \frac{\partial(\rho \cdot \vec{u})}{\partial t} \quad (6)$$

برای یک دستگاه چرخان با اعمال سرعت نسبی رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$+\vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{u}_r \cdot \vec{u}_r) + \rho \vec{\Omega} \times (2\vec{u}_r + \vec{\Omega} \times \vec{r}) + \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \times \vec{r} \frac{\partial(\rho \cdot \vec{u}_r)}{\partial t} \quad (7)$$

جهت تحلیل جریان حول پروانه لازم است تنظیماتی برای نرم افزار فلونت در نظر گرفته شود. برای این منظور برای تحلیل پروانه در نزدیک سطح از تنظیمات ارایه شده در مرجع [۸] استفاده شده است.

۳- مشخصات هندسی و شرایط مرزی

در این تحقیق مدل پروانه ای از سری استاندارد ب- وگنینگن استفاده شده که مشخصات هندسی آن در جدول (۲) آورده شده است. برای حل عددی جریان اطراف پروانه ابتدا ابعاد دامنه‌ی محاسباتی انتخاب شده است. این ابعاد طوری انتخاب شده که در کنار ارضای مرزهای بینهایت، زمان محاسباتی کمتری داشته باشد. در شکل (۱) ابعاد دامنه محاسباتی برحسب قطر پروانه و همچنین شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل (۲) نمای کلی از دامنه حل نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱)، H فاصله محور پروانه بر حسب متر از سطح آب می‌باشد. با توجه به شرایط مساله مورد نظر مرز ورودی ناحیه حل از دو قسمت مجزای ورودی آب و هوا تشکیل شده است که به طور جداگانه تعریف شده است. برای شرط مرزی، در مرز ورودی شرط سرعت یکنواخت لاروی سطح تیغه‌ها و تویی شرط عدم لغزش در مرزهای جانبی شرط مرزی لغزش و در مرز خروجی شرط مرزی فشارخروجی در نظر گرفته شده است.

۴- مشخصات هندسی و شرایط مرزی

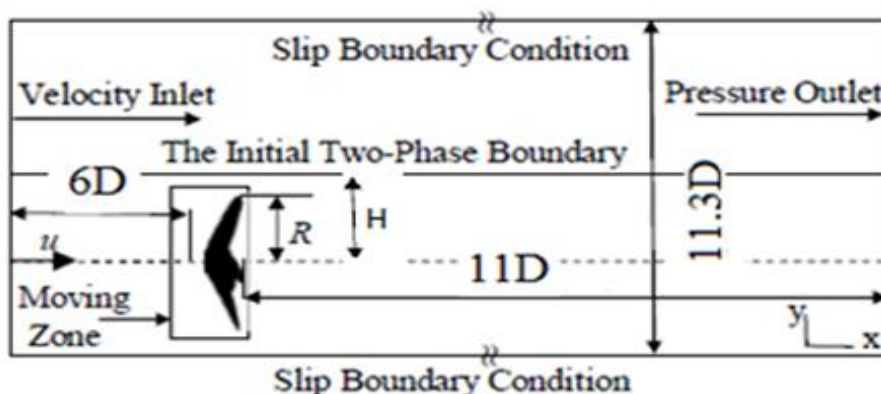
در مطالعه‌ی حاضر برای تولید مدل هندسی پروانه از نرم افزار سالید ورکس استفاده شده است. برای تولید شبکه از ابزار مش و تحلیل‌های موجود در نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. به دلیل پیچیدگی هندسه پروانه در ناحیه متحرک دامنه محاسباتی از شبکه بندی سازمان نیافته با سلول‌های چهاروجهی تتراهدرال به نحوی استفاده شده است، که شبکه سطح تیغه‌های پروانه‌ها از سلول‌های مثلثی تشکیل شده است. از موارد مهمی که در تحلیل عددی باید به آن توجه نمود اندازه شبکه‌های تولید شده می‌باشد. اندازه شبکه در نتایج تحلیل بسیار موثر می‌باشد. درشت بودن شبکه سبب خطا در تحلیل می‌گردد. لذا بهتر است سایر شبکه‌ها تا حد امکان ریز باشد. با افزایش تعداد شبکه‌ها حجم محاسبات زیاد و در نتیجه زمان محاسبات زیاد می‌شود. از طرفی باید اندازه شبکه‌ها به گونه ای باشد که با افزایش تعداد شبکه‌ها تغییر زیادی در نتایج ایجاد نگردد. با توجه به موارد فوق شبکه بندی سطح تیغه‌های پروانه به نحوی انجام شده که ناحیه نزدیک نوک، ریشه تیغه‌ها و لبه‌های تیغه با مثلث‌های کوچکتری شبکه بندی شده است. نواحی داخلی روی تیغه‌ها با مثلث‌های بزرگتری شبکه بندی شده به طوری که اندازه ضلع‌های آن به تدریج و با نسبت رشد ۱/۰۷ افزایش یافته است شکل (۳) قسمتی از شبکه تولید شده در سطح پروانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تنظیمات اصلی مورد استفاده در نرم افزار فلوئنت

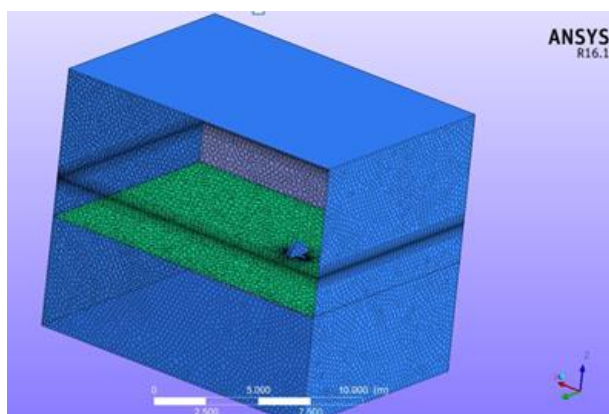
عنوان	روش انتخابی
حلگر	ضمنی، مجزا
کویل میدان سرعت-فشار	سیمپل
مدل توربولانسی	k-Sst ω
روش دو فازی	حجم سیال
روش گسسته سازی انرژی جنبشی آشفتگی	بالا دست مرتبه دوم

جدول ۲- مشخصات هندسی پروانه

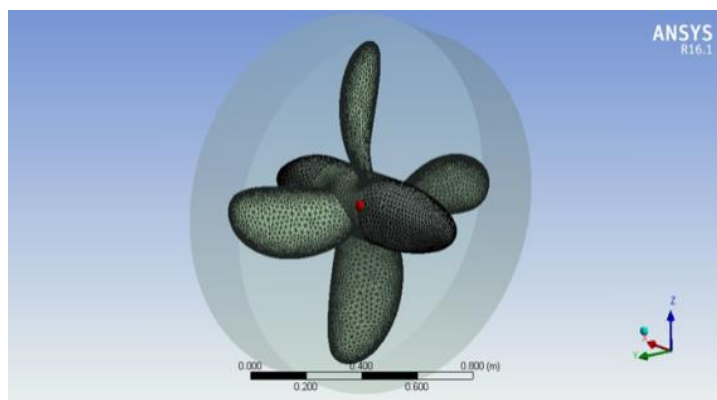
تعداد پره‌ها	۴
قطر (m)	۱/۱۵
$\frac{P}{D}$	۱/۱۵
$\frac{A_E}{A_0}$	۰/۴
$\frac{D_{hub}}{D}$	۰/۱۵۸



شکل ۱- نمای از پروانه و میدان محاسباتی حول آن



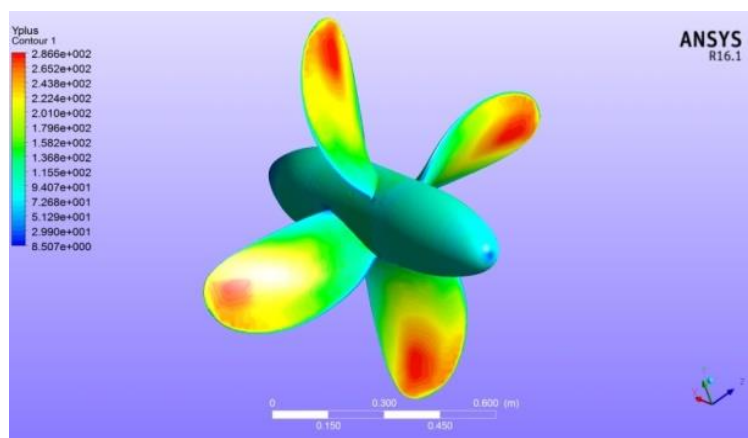
شکل ۲- نمای کلی از دامنه حل



شکل ۳- نمایی از ایجاد شبکه بر روی پروانه

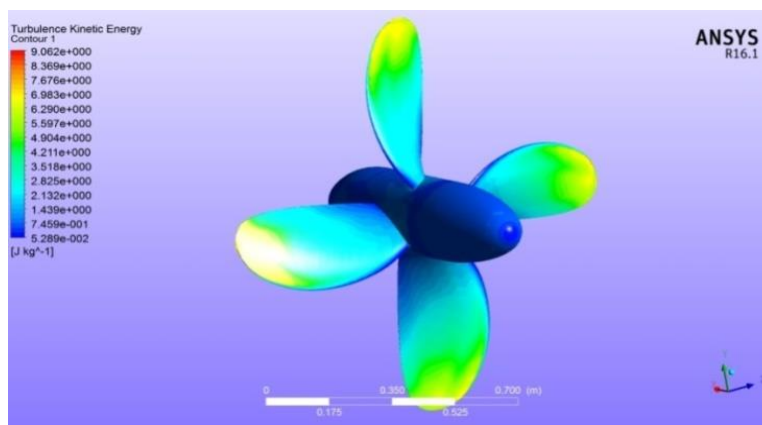
جدول ۳- تغییرات ضریب تراست و گشتاور در شبکه های مختلف

تعداد المان	ضریب تراست	ضریب گشتاور	شبهه
۱۶۵۴۴۱۵	۰/۱۷۷	۰/۰۲۸	درشت
۲۱۱۸۷۵۱	۰/۱۷۶	۰/۰۲۷	متوسط
۲۵۱۹۶۶۸	۰/۱۷۴	۰/۰۲۶	ریز
۳۲۱۴۲۱۰	۰/۱۷۴	۰/۰۲۶	بسیار ریز

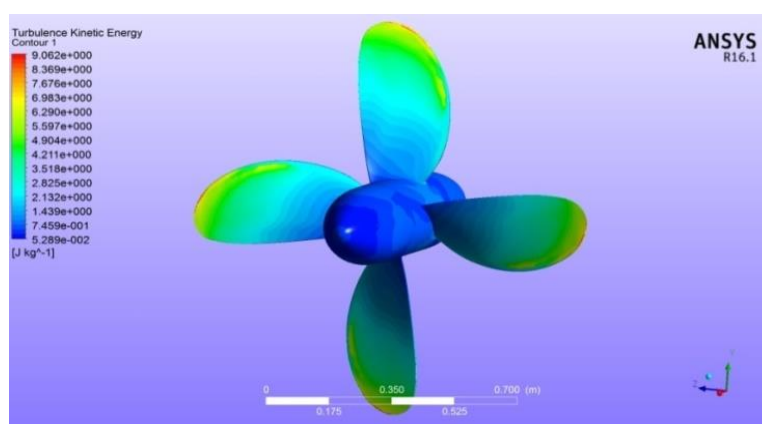


شکل ۴- کانتور y^+ روی پروانه با شبکه ریز در حالت $J=0.9$

یکی از موارد مهم در شبیه سازی عددی، بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه است. با افزایش تعداد نقاط شبکه نتایج دقیق تری به دست می آید اما از طرف دیگر، هزینه محاسباتی و زمان حل مساله افزایش خواهد یافت. در تحقیق حاضر، مطالعه شبکه در حالت غیردائم با مقایسه نتایج مربوط به ضریب تراست و گشتاور در $J=0.9$ و در عمق ۲ متری روی چهار شبکه مختلف انجام شده است. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود، نتایج شبکه ریز و بسیار ریز نسبت به یکدیگر تغییرات زیادی نداشته است. مدت زمان اجرا در حالت غیردائم با شبکه ریز حدود ۲۵ ساعت بوده است. بنابراین به منظور حفظ دقت و همچنین جلوگیری از افزایش هزینه محاسباتی برای سایر شبیه سازی ها از شبکه ریز استفاده شده است.



شکل ۵- نمای ایزومتریک از انرژی آشفتگی (k) روی پروانه با شبکه ریز در حالت $J=0.9$



شکل ۶- نمای ایزومتریک از انرژی آشفتگی (k) روی پروانه با شبکه ریز در حالت $J=0.9$

در شکل (۴) کانتور γ^+ روی پروانه با شبکه ریز در $J=0.9$ و عمق ۲ متر نشان داده شده است. مقدار متوسط این پارامتر ۱۴۸ بوده که با توجه به تابع دیواره استفاده شده در محدوده‌ی مجاز قرار دارد. در شکل‌های (۵) و (۶) مقادیر انرژی جنبشی جریان آشفتگی (k) روی پروانه با شبکه ریز در $J=0.9$ و عمق ۲ متر نشان داده شده است. نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقادیر انرژی جنبشی جریان آشفتگی (k) می‌بایست کمتر از ۳۰ یا ۴۰ باشد تا حل از این نظر معتبر باشد شکل‌های (۵) و (۶) به خوبی نشان می‌دهد که این محدوده رعایت شده است بنابراین با توجه به تمامی مطالب گفته شده، حل و جواب‌های مسئله مورد قبول و صحیح می‌باشند. انرژی جنبشی آشفتگی از سه ترم تولید، پخش و اتلاف تشکیل شده است که این سه ترم دائما در حال برهم کنش با یکدیگر می‌باشند.

۵- بررسی نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی

در این تحقیق با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی پروانه مورد بررسی در نزدیک سطح، به بررسی صحت حل عددی با استفاده از مدل‌های چرخشی دستگاه مرجع چرخان در حالت دایمی جریان و شبکه لغزان در حالت گذرا در شرایط آب آزاد پرداخته شده که نتایج مذکور جهت بررسی مناسب بودن شبکه بندی انتخاب شده و همچنین در نحوه تحلیل عددی قابل کاربرد می‌باشد.

با توجه به اینکه نمونه پروانه مورد استفاده جهت مدل سازی عددی از نوع پروانه‌های سری استاندارد بوده (پروانه‌ی ۴ پره‌ای سری بی - وگنینگن) محاسبه مقادیر تجربی ضرایب عملکرد هیدرودینامیکی آنها قبلاً از طریق انجام تست آب آزاد صورت پذیرفته است. لذا می‌توان به آسانی با مراجعه به کتب و مراجع مختلف نظیر Carlton [۱۵] و با استفاده از روشی مشابه آنچه که در آن مراجع آمده است اقدام به محاسبه مقادیر η_{kt}, Kq نمود. مطابق جداول (۴)، (۵) و (۶) نتایج حاکی از تطابق بسیار خوب نتایج عددی با نتایج تجربی دارد.

۵-۲- بررسی ضریب‌های عملکرد پروانه در عمق‌های مختلف

در این بخش نتایج حاصل از بررسی ضریب‌های عملکرد پروانه در عمق‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ متر و کاملاً مغروق^۱ در نسبت‌های پیش روی ۰/۹، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۴۵، ۰/۳۳ با هم مقایسه شده است. در حالت کاملاً مغروق عمقی معادل 8D (۸ برابر قطر پروانه) در نظر گرفته شده است در شکل‌های (۷) و (۸) منحنی‌های ضریب‌های گشتاور پیچشی، نیروی پیش رانش در عمق‌های اشاره شده جهت مقایسه ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه ضریب پیش رانش مطالعه عددی با نتایج تجربی مرجع [۱۵]

J	Kt نتایج تجربی [۱۵]	Kt تحقیق حاضر	درصد خطا
۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۲۷	۳/۵۷
۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۲۳	۱۱/۵۳
۰/۶	۰/۲۳	۰/۲۱	۸/۶۹
۰/۸	۰/۱۸	۰/۱۵	۱۶/۶۶

جدول ۵- مقایسه گشتاور پیچشی مطالعه عددی با نتایج تجربی مرجع [۱۵]

J	KQ نتایج تجربی [۱۵]	KQ تحقیق حاضر	درصد خطا
۰/۳۳	۰/۰۵۷	۰/۰۵۳	۷/۰۲
۰/۴۵	۰/۰۵۱	۰/۰۴۹	۳/۹۲
۰/۶	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲	۴/۵۴
۰/۸	۰/۰۳۶	۰/۰۳۴	۵/۵۵

جدول ۶- مقایسه بازده مطالعه عددی با نتایج تجربی مرجع [۱۵]

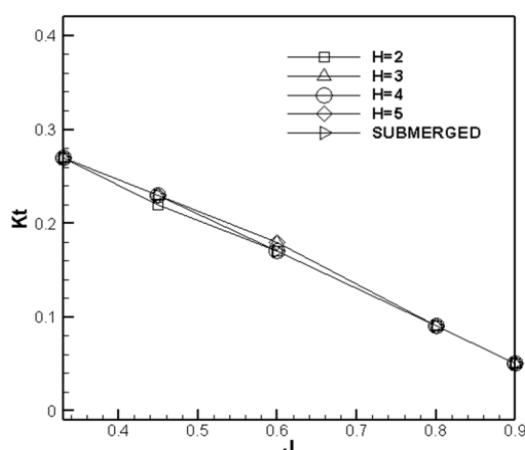
J	η نتایج تجربی [۱۵]	η تحقیق حاضر	درصد خطا
۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۶	۸/۳
۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۶	۴/۳۴
۰/۶	۰/۵۶	۰/۵۹	۵/۰۸
۰/۸	۰/۶۸	۰/۷	۲/۸۵

¹ Submerged

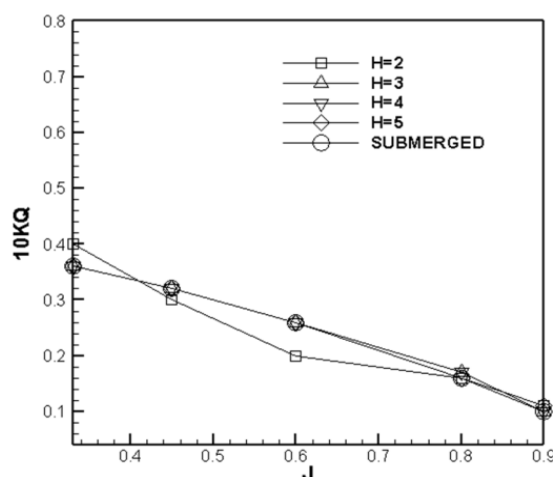
با توجه به شکل (۷) و (۸) ضریب عملکرد پروانه در عمق‌های مختلف با افزایش نسبت‌های پیش روی کاهش می‌یابد. نحوه تغییرات منحنی ضریب‌های گشتاور پیچشی و نیروی پیش رانش یکسان بوده و از یکدیگر تبعیت می‌کند.

در شکل (۹) نمودار راندمان پروانه در عمق‌های مختلف برحسب نسبت پیش روی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در نسبت پیش روی کمتر از $0/8$ راندمان پروانه افزایش داشته و بعد از آن روند کاهشی پیدا کرده است. به عنوان مثال در عمق ۳ متری در نسبت پیشروی $0/8$ راندمان برابر $0/69$ و در نسبت پیش روی $0/9$ برابر $0/63$ می‌باشد.

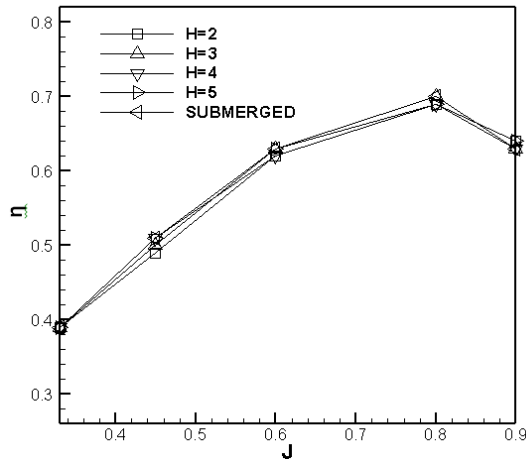
با توجه به شکل (۸) اختلاف زیاد ضریب گشتاور برای عمق ۲ متر نسبت به سایر عمق‌ها به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه، ضریب گشتاور پیچشی نسبت به شرایط آزاد حدود ۱۳ درصد کاهش نسبت به حالت مغروق و شرایط آزاد به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه و همچنین می‌تواند ناشی از ایجاد تهویه در پروانه و عملکرد آن در حالت دوفازی در فواصل نزدیک سطح باشد. بدین منظور برای تعیین ضریب‌های عملکرد پروانه به صورت تجربی در شرایط آب آزاد پیشنهاد می‌شود که حداقل عمق غوطه وری پروانه ۳ برابر شعاع پروانه انتخاب شود [۱۶].



شکل ۷- مقایسه ضریب عملکرد در عمق‌های مختلف



شکل ۸- مقایسه ضریب عملکرد در عمق‌های مختلف

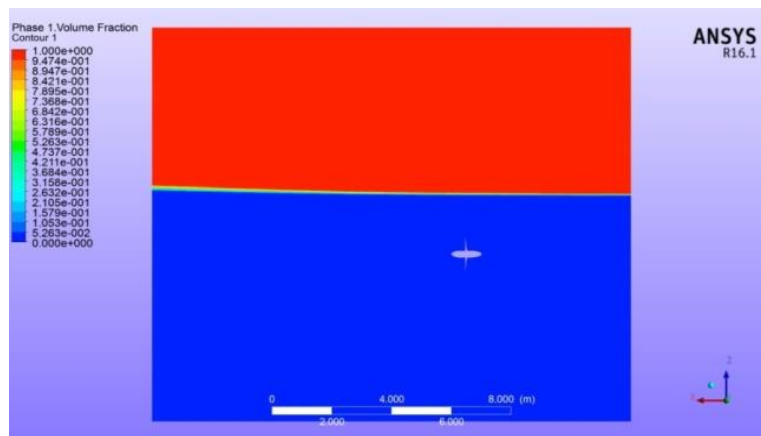


شکل ۹- مقایسه راندمان محاسباتی در عمق‌های مختلف

۵-۳- مدل سازی عددی

در شکل (۱۰) کسر حجمی بخار در $H=2$ و $J=0.9$ ارائه شده است. همانگونه که قابل مشاهده است این کانتور از سه قسمت تشکیل شده یک قسمت جریان هوا بالای سطح آزاد آب مرز بین آب و هوا و در نهایت آب که کسر حجمی برای هوا ۱ و هرچه به سمت درون آب برویم این مقدار به صفر می‌رسد به عبارتی در درون مایع در صد فاز بخار به صفر می‌رسد.

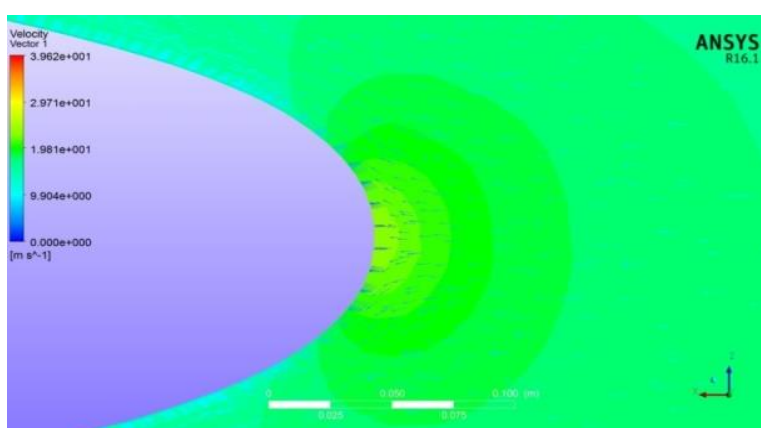
با توجه به شکل (۱۱) کانتور سرعت حول پروانه نشان داده شده است. این کانتور در عمق ۲ و $J = 0.9$ می‌باشد. بیشینه مقدار آن در نوک پروانه می‌باشد و هرچه به سمت هاب نزدیک شده این مقدار کاهش پیدا می‌کند. وقتی جریان به سمت نوک هاب می‌رسد سرعت سیال براساس اصل عدم لغزش به مقدار صفر رسیده که این امر کاملاً بدیهی است. یکی از مهم ترین عوامل بر عملکرد پروانه در کنار سطح پدیده هوادهی است. با نزدیک نمودن هر چه بیشتر محور پروانه به سطح آب و یا افزایش سرعت چرخش پروانه در نزدیک سطح این پدیده می‌تواند بوجود آمده یا شدت یابد. اگر نفوذ هوا به درون آب افزایش یابد انتظار می‌رود علاوه بر افزایش بار نوسانی بر روی تیغه‌های پروانه ضریب‌های عملکرد پروانه نیز کاهش یابد. در شکل (۱۲) به بررسی بردار سرعت در نوک Boss پروانه پرداخته شده است.



شکل ۱۰- نمای از کسر حجمی فاز بخار و مایع، $H=2, J=0.9$



شکل ۱۱- نمایی از توزیع سرعت پروانه، $H=2, J=0.9$



شکل ۱۲- بردار سرعت در نوک Boss پروانه، $H=2, J=0.9$

۵-۴- بررسی نیرو در عمق‌های مختلف

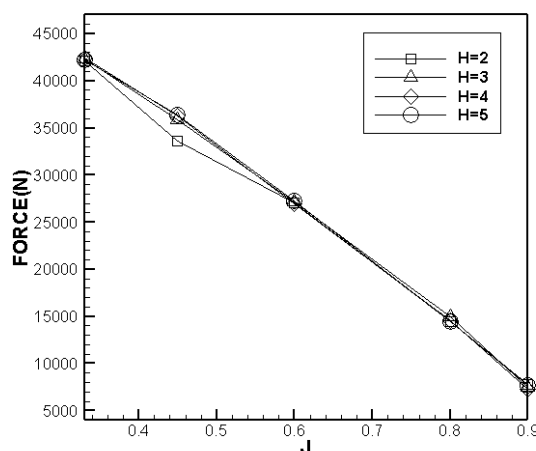
در شکل (۱۳) منحنی‌های مولفه افقی نیرو در جهت محور X در عمق‌های مختلف و در ضریب پیشروی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به شکل (۱۳) با افزایش ضریب پیشروی در عمق‌های مختلف مولفه نیرو کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال در عمق ۳ متری و در ضریب پیشروی 0.45 نیرو برابر $35826/34$ و در ضریب پیشروی 0.9 برابر $7454/39$ می‌باشد. پس با افزایش ضریب پیشروی نیرو افقی در عمق‌های مختلف کاهش پیدا کرده است. نرخ کاهش ضریب‌های عملکرد پروانه در نزدیک سطح نسبت به شرایط آب آزاد افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش در نسبت پیشروی 0.45 می‌باشد. علت این مورد هم مشابه قبل ناشی از ایجاد موج سطحی توسط پروانه در عمق ۲ متری بوده و همچنین ناشی از ایجاد هوادهی در پروانه و عملکرد آن در حالت دوفازی در فواصل نزدیک سطح می‌باشد.

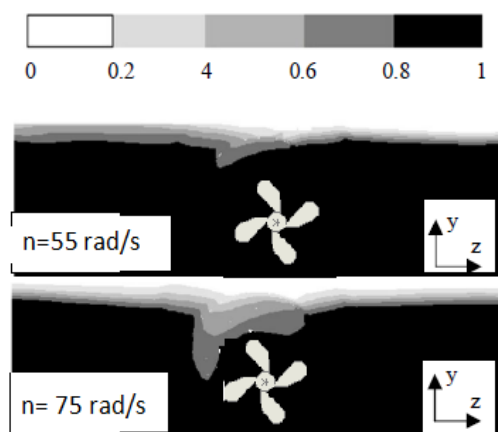
۵-۵- تاثیر پدیده‌ی هوادهی بر عملکرد پروانه در نزدیک سطح

یکی از موثرترین عوامل بر عملکرد پروانه در کنار سطح پدیده هوادهی می‌باشد. با نزدیک نمودن هر چه بیشتر محور پروانه به سطح آب و یا افزایش سرعت چرخش پروانه در نزدیک سطح این پدیده می‌تواند بوجود

آمده یا شدت یابد. برای این منظور با افزایش سرعت چرخش پروانه از ۵۵ رادیان بر ثانیه به ۷۵ رادیان بر ثانیه تاثیر پدیده تهویه بر ضریب‌های عملکرد پروانه بررسی شده است. تغییرات نسبت حجمی آب حول پروانه در مقطع عرضی قرار گرفته در وسط محور تویی پروانه و مقادیر ضریب‌های عملکرد پروانه در سرعت‌های زاویه‌ای ۵۵ رادیان بر ثانیه و ۷۵ رادیان بر ثانیه حاصل از تحلیل عددی انجام شده به ترتیب در شکل (۱۴) و جدول (۷) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت چرخش پروانه میزان نفوذ هوا به درون آب افزایش یافته است لذا انتظار می‌رود علاوه بر افزایش بار نوسانی بر روی تیغه‌های پروانه ضریب‌های عملکرد پروانه نیز کاهش یابد. ضریب‌های عملکرد مندرج در جدول (۷) این امر را تصدیق می‌کند.



شکل ۱۳- مقایسه مولفه افقی نیرو در جهت X در عمق‌های مختلف



شکل ۱۴- کانتورهای نسبت حجمی (آب) حول پروانه در مقطع عرضی به ازای سرعت چرخشی پروانه ($J=0.45$)

جدول ۷- ضریب‌های عملکرد پروانه به ازای سرعت چرخشی پروانه ($J=0.45$)

$n(\text{rad/s})$	K_t	K_Q
۵۵	۰/۲۳	۰/۳۲
۷۵	۰/۲۱	۰/۲۹

۵-۶- بررسی تاثیر عمق غوطه وری بر عملکرد پروانه (نیمه مغروق)

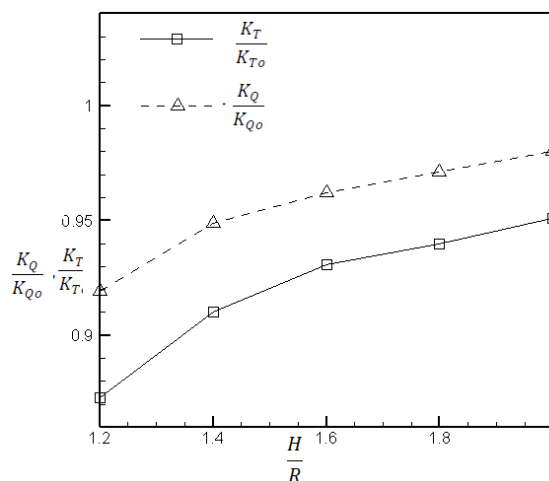
در این بخش اثر عمق غوطه‌وری بر ضریب‌های عملکرد پروانه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور حل عددی جریان حول پروانه در نسبت پیش روی $0/45$ و نسبت‌های 2 ، $1/8$ ، $1/6$ ، $1/4$ ، $1/2$ انجام شده است. با توجه به حل جریان در حالت گذرا، جهت مدل نمودن چرخش پروانه در سرعت چرخشی ثابت 55 رادیان بر ثانیه استفاده شده است. نتایج حاصل از جریان شامل، نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های مربوطه در شرایط آب آزاد بر حسب نسبت‌های غوطه‌وری پروانه در جدول (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۸) مشاهده می‌گردد که با کاهش نسبت غوطه‌وری پروانه از 2 به $1/2$ ضریب پیش رانش $7/7$ درصد نسبت به ضریب‌های عملکرد در شرایط آب آزاد کاهش یافته است.

جهت مشخص نمودن نحوه تغییرات ضریب‌های نسبی، منحنی ضریب‌ها در شکل (۱۵) ارائه شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با کاهش نسبت غوطه‌وری از ضریب‌های عملکرد پروانه نسبت به شرایط آب آزاد کاسته شده به نحوی که در نسبت غوطه‌وری $1/2$ با توجه به تحلیل عددی انجام شده به میزان $12/7$ درصد از نیروی پیش رانش پروانه در شرایط آب آزاد کاسته می‌شود.

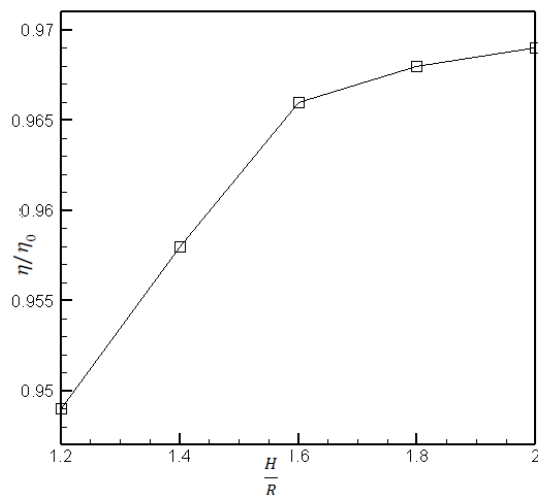
با توجه به ضریب‌های عملکرد بدست آمده، نسبت بازده محاسباتی پروانه به بازده محاسباتی در شرایط آب آزاد بر حسب نسبت غوطه‌وری طبق شکل (۱۶) قابل ارائه می‌باشد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که کاهش عمق غوطه‌وری باعث کاهش بازده پروانه نسبت به شرایط آب آزاد می‌شود.

جدول ۸- نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های عملکرد در شرایط آب آزاد به ازای نسبت غوطه‌وری

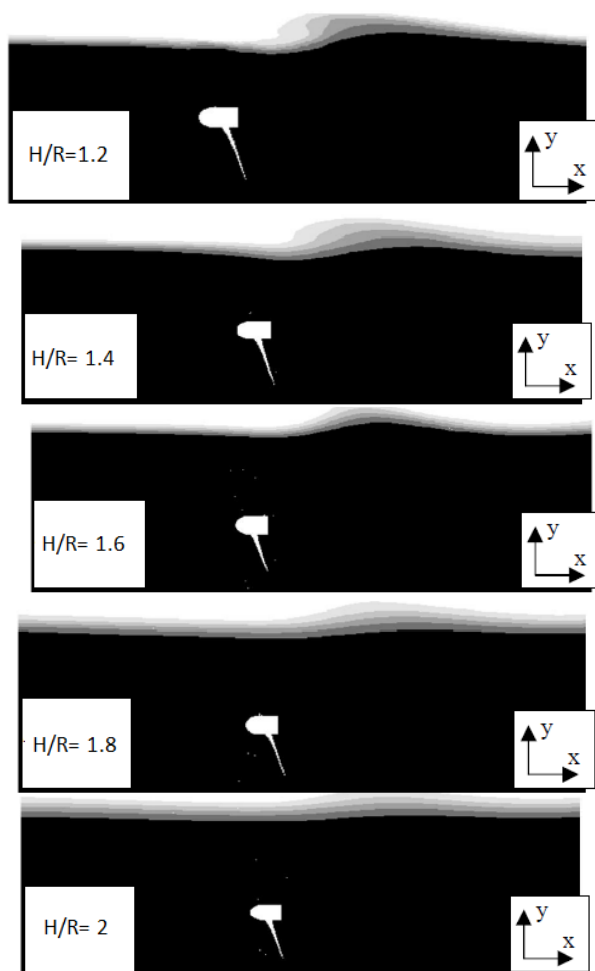
$\frac{H}{R}$	$\frac{Kt}{Kt0}$	$\frac{KQ}{KQ0}$
$1/2$	$0/873$	$0/920$
$1/4$	$0/910$	$0/950$
$1/6$	$0/930$	$0/962$
$1/8$	$0/939$	$0/969$
2	$0/950$	$0/980$



شکل ۱۵- تغییرات نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های عملکرد آب آزاد بر حسب نسبت غوطه‌وری



شکل ۱۶- نسبت بازده پروانه به بازده در شرایط آب آزاد برحسب نسبت غوطه وری



شکل ۱۷- نمای تغییرات سطح آب به ازای نسبت غوطه وری پروانه

جهت بررسی موج‌سازی پروانه در نزدیک سطح، نمای امواج تولیدی توسط پروانه در نسبت‌های غوطه‌وری در نظر گرفته شده در شکل (۱۷) ارایه شده، همانطور که دیده می‌شود با افزایش عمق غوطه‌وری پروانه از میزان ارتفاع امواج کاسته شده است.

۶- نتیجه گیری

دینامیک سیالات محاسباتی بعنوان یک ابزار قدرتمند می‌تواند برای تحلیل بسیاری از پدیده‌های پیچیده از جمله عملکرد یک پروانه مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت و شبیه سازی دو فازی سیال به بررسی اثر سطح آزاد بر عملکرد هیدرودینامیکی یک نمونه پروانه پرداخته شده است. شبیه سازی عددی جریان براساس مدل $k-\omega SST$ روشی مفید و مناسب برای آنالیز جریان حول پروانه و به دست آوردن منحنی‌های عملکرد پروانه می‌باشد.

دقت شبیه سازی دائم انجام شده به منظور استخراج منحنی عملکرد پروانه کافی بوده و انجام شبیه سازی غیر دائم و صرف هزینه محاسباتی بالاتر در این خصوص منجر به افزایش دقت نخواهد شد. برخلاف نتایج کلی و عملکردی پروانه مانند ضریب تراست و گشتاور، نتایج میدان جریان در ناحیه دنباله شدیداً به ابعاد شبکه در این ناحیه بستگی دارد.

ضریب عملکرد پروانه در عمق‌های مختلف با افزایش نسبت‌های پیش روی کاهش می‌یابد. نحوه تغییرات منحنی ضریب‌های گشتاور پیچشی و نیروی پیش رانش یکسان بوده و از یکدیگر تبعیت می‌کند. به عنوان نمونه ضریب گشتاور پیچشی در عمق ۳ متری و در ضریب پیشروی 0.33 برابر 0.36 و در ضریب پیشروی 0.6 برابر 0.26 که حدود $27/77$ در صد کاهش داشته است.

در بررسی راندمان پروانه در عمق‌های مختلف در نسبت پیش روی کمتر از 0.8 راندمان پروانه افزایش داشته و بعد از آن روند کاهشی پیدا کرده است. به عنوان مثال در عمق ۳ متری در نسبت پیشروی 0.8 راندمان برابر 0.69 و در نسبت پیش روی 0.9 برابر 0.63 می‌باشد. کاهش جزئی راندمان ناشی از کاهش تقریباً متناسب هردو ضریب نیروی پیش رانش و گشتاور پیچشی می‌باشد.

با توجه به تحلیل عددی انجام شده، مشخص گردید که در صورت کارکرد پروانه در نزدیک سطح، با کاهش نسبت غوطه‌وری از ۲ به $1/2$ به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه، ضریب‌های گشتاور پیچشی و نیروی پیش رانش به ترتیب به میزان ۶ درصد و $7/7$ درصد نسبت به ضرایب عملکرد در شرایط آب آزاد کاهش یافته است. همچنین راندمان نیز نسبت به شرایط آب آزاد $5/1$ درصد کاهش می‌یابد. نرخ این کاهش برای ضریب‌های عملکرد و راندمان به ترتیب در نسبت‌های غوطه‌وری $1/4$ و $1/6$ بیشتر می‌گردد. علت این پدیده می‌تواند ناشی از ایجاد تهویه در پروانه و عملکرد آن در حالت دو فازی (آب و هوا) در فواصل نزدیک سطح باشد. بدین منظور برای تعیین ضریب‌های عملکرد پروانه به صورت تجربی در شرایط آب آزاد پیشنهاد می‌شود که حداقل عمق غوطه‌وری پروانه ۳ برابر شعاع پروانه انتخاب شود.

اختلاف زیاد ضریب گشتاور برای عمق ۲ متر نسبت به سایر عمق‌ها به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه، ضریب گشتاور پیچشی نسبت به شرایط آزاد حدود ۱۳ درصد کاهش نسبت به حالت مغروق و شرایط آزاد به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه و همچنین می‌تواند ناشی از ایجاد هوادهی در پروانه و عملکرد آن در حالت دو فازی در فواصل نزدیک سطح باشد.

با توجه به نتایج تحلیل عددی مشخص گردید که افزایش سرعت چرخش پروانه باعث افزایش میزان هوادهی در پروانه می‌گردد، به نحوی که $8/69$ درصد از ضریب پیش رانش و $9/38$ درصد از گشتاور پیچشی کاسته می‌شود.

مراجع

- [1] Watanabe, T., Kawamura, T., Takekoshi, Y., Maeda, M., and Rhee, S.H., "Simulation of Steady and Unsteady Cavitation on a Marine Propeller using a RANS CFD Code", In Proceedings of The Fifth International Symposium on Cavitation (CA V2003), Wageningen, The Netherlands, (2003).
- [2] Nakisa, M., Abbasi, M.J., and Amini, A.M., "Assessment of Marine Propeller Hydrodynamic Performance in Open Water via CFD", In Proceedings of the 7th International Conference on Marine Technology, 11-12 December, Bangladesh University of Engineering and Technology, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, BUET, Dhaka, Bangladesh, (2010).
- [3] Faltinsen, O.M., "Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway", In Proceedings of the 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, 6-8 October, Tokyo, Japan, (1980).
- [4] Young, Y.L., and Kinnas, S.A., "Performance Prediction of Surface-piercing Propellers", Journal of Ship Research, Vol. 48(4), pp. 288-304, (2004).
- [5] Caponnetto, M., "RANSE Simulations of Surface Piercing Propellers", In Proceedings of the 6th Numerical Towing Tank Symposium, Rome, Italy, (2003).
- [6] Olofsson, N., "Force and Flow Characteristics of a Partially Submerged Propeller", Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, (1996).
- [7] Koushan, K., "Dynamics of Ventilated Propeller Blade Loading on Thrusters", In Proceedings of the World Maritime Technology Conference, London, England, pp. 6-10 (2006).
- [8] Califano, A., and Steen, S., "Analysis of Different Propeller Ventilation Mechanisms by Means of RANS Simulations", In Proceedings of the First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, (2003).
- [9] Young, Y.L., and Kinnas, S.A., "Analysis of Supercavitating and Surface-piercing Propeller Flows via BEM", Computational Mechanics, Vol. 32(4-6), pp. 269-280, (2003).
- [10] Pustoshny, V., Bointsov, V., Lebedev, P., and Stroganov, A., "Development of 5-blade SPP Series for Fast Speed Boat", In Proceeding of the 9th International Conference on Fast Sea Transportation, 23-27 September, Shanghai, China, (2007).
- [11] Adjali, S., Imine, O., Aounallah, M., and Belkadi, M., "Numerical Simulation of Free Surface Water Wave for the Flow Around NACA 0012 Hydrofoil and Wigley Hull using VOF Method", World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol. 9(5), pp. 884-888, (2015).

- [12] Menter, F.R., "Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, Vol. 32(8), pp. 1598-1605, (1994).
- [13] Hirt, C.W., and Nichols, B.D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol. 39(1), pp. 201-225, (1981).
- [14] Rishehri, M., Seif, M.S., and Banisi, A.H., "Study on Performance of the Propeller in the Wake Field of Marine Vehicle with using Computational Fluid Dynamics", In Proceedings of the Ninth Marine Industries Conference, October, Mazandaran, Iran (2007).
- [15] Carlton, J.S., "*Marine Propellers and Propulsion*", Second Edition, Elsevier Ltd, British (1994).
- [16] (ITTC) "Testing and Extrapolation Methods Propulsion and Propulsor Open Water Test", Proceedings of The 23th International Towing Tank Conference, ITTC'02, Procedure 7.5-02-03-02.1, Revision 01, 8-14 September, Venice, Italy, (2002).

فهرست نمادهای انگلیسی

A_E/A_0	نسبت سطح گسترش یافته پروانه به سطح تصویر شده
P/D	نسبت گام به قطر
Br	نسبت هاب به قطر پروانه
R	زاویه ریک پروانه (deg)
D	قطر پروانه (m)
V_A	سرعت پیشروی (m/s)
n	سرعت دورانی پروانه (rpm)
ρ	چگالی (Kg/m^3)
T	نیروی تراست پروانه (N)
Q	گشتاور پروانه (N.m)
J	ضریب پیشروی ($J=VA/n.D$)
K_T	ضریب نیروی تراست ($KT=T/D^4 \cdot n^2 \cdot \rho$)
K_Q	ضریب گشتاور ($KQ=Q/D^5 \cdot n^2 \cdot \rho$)
η	ضریب گشتاور ($J.KT/KQ \cdot 2\pi$)

Abstract

In this study, the effect of different depths on the performance and efficiency of a B-Wageningen series close to surface of water have been numerically investigated. For this purpose, the ANSYS-FLUENT commercial software has been used to solve the viscous, incompressible and two phase flow field. The rotation of the propeller has been implemented using the rotating reference frame model for steady flow and the sliding mesh for unsteady flow. For turbulent flow modeling and free surface simulation, the $k-\omega$ SST model and the volume of fluid method have been used, respectively. For validation of numerical results due to lack of access to experimental results of propeller close to surface, numerical solution in open water condition has been performed and performance coefficients have been calculated. Comparing the numerical results with the experiment ones shows good agreement. The results of the numerical solution show.