



تعیین مشخصات کارکردی پروانه‌های دریایی به کمک CFD

رحمت ارازگلدی^۱، علی حاجیلوی^۲، بیژن فرهانیه^۳

دانشگاه صنعتی شریف- دانشکده مکانیک

arazgaldy@mehr.sharif.edu

چکیده:

جریان اطراف یک پروانه دریایی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی^۴ و بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده ناویر- استوکس^۵ مدل می‌شود. استراتژی مش‌بندی مناسب بیان گردیده و استقلال حل از شبکه آن بررسی می‌شود. مشخصات کارکردی پروانه در حالت آب آزاد^۶ به صورت عددی بدست آورده می‌شود. نتایج بدست آمده با نتایج پروانه مدل تست شده در تونل کاویتاسیون مقایسه می‌شود. نتایج نهایی نشان می‌دهد که این روش برای پروانه‌های دریایی قابل استفاده است و نتایج مفیدی دارد.

کلمات کلیدی: پروانه دریایی- آب آزاد- CFD- RANS

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

۲ دانشیار دانشکده مکانیک

۳ استاد دانشکده مکانیک

Computational Fluid Dynamics: CFD 4

Reynolds Averaged Navier-Stokes: RANS 5

Open Water 6



مقدمه

انتخاب پروانه بهینه و متناسب بدنه کشتی و نیز انتخاب موتور مناسب در درازمدت تأثیر قابل توجهی در عملکرد کشتی و مصرف سوخت و هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهند داشت. معیارهای مهم در انتخاب پروانه، نیروی پیشرانش تولیدی، راندمان بالا و عدم یا کمترین احتمال وقوع کاویتاسیون می‌باشند [۱].

امروزه استفاده از کامپیوتر بخش جدایی‌ناپذیر طراحان پروانه است. استفاده روزافزون از الگوریتمهای عددی علاوه بر دلایلی مانند ملاحظات زمانی و صرفه‌جویی در هزینه، از جهت امکان بررسی پارامترهای گوناگون در مطالعات سیستماتیک نیز حائز اهمیت است. به عنوان مثال اثر شکل لبه حمله در بررسی توزیع فشار جهت جلوگیری از کاویتاسیون در مقاطع مختلف پروانه از این موارد است [۲].

ساده‌ترین حالت بررسی پروانه‌های دریایی در شرایط آب آزاد است. در این شرایط طبق تعریف مشخصات کارکردی شامل بررسی نیروها و گشتاورهای وارد بر پروانه هنگام کارکرد در جریان سیال یکنواخت است [۳].

روشهای RANS به عنوان یک ابزار کاربردی بجای روشهای معمول که بر پایه تئوری پتانسیل هستند توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این روشها نه تنها برای جریان لزج اطراف کشتی بلکه برای پروانه‌های دریایی نیز به صورت موفقیت‌آمیزی بکار برده شده‌اند. اما چون در اکثر موارد از مش‌بندی ساخت‌یافته^۱ استفاده شده است نتایج محاسبات حاصله فقط برای جریان پایدار در شرایط آب باز محدود شده است از طرفی در حالت مش‌بندی ساخت‌یافته به علت پیچیدگی هندسه در پروانه، تولید مشی که برای بیان فیزیک جریان (مثلاً ورتکس نوک) ریزباشد بسیار سخت است. بنابراین استفاده از مش‌بندی غیرساخت‌یافته^۲ لازم است [۴].

شبیه‌سازی عددی پروانه دریایی بخاطر مشکلاتی مانند هندسه‌های پیچیده، احتمال کاویتاسیون، مدل کردن توربولانس، لایه مرزی، جدایش جریان و ... مشکل است. پروانه‌ها در میدان ویک کشتی کار می‌کنند. اثر لایه مرزی از طریق ایجاد توزیع سرعت در میدان ویک نزدیک بدنه و تاثیرگذاری این امر در مشخصات کارکردی پروانه‌ها مشخص است [۵].



روش عددی

برای حل عددی، از نرم‌افزار تجاری فلوئنت نسخه ۶/۱ استفاده شد. فلوئنت کد حجم محدود بر پایه مش بندی غیرساخت‌یافته است. جزئیات مربوط به روش عددی در متن راهنمای فلوئنت ۶/۱ آورده شده است [۶]. مدل توربولانس استفاده شده مدل $k-\epsilon$ استاندارد است. تست‌های دیگری با مدل‌های مختلف توربولانس مانند مدل تنش رینولدز انجام شده است اما همگرایی بسیار مشکل بوده و تفاوت خاصی بدست نیامده است (کمتر از ۱٪ تغییر در ضریب پیشروی) [۵]. از نوع حل تفکیک شده^۱ و الگوریتم SIMPLE به عنوان کوپل کننده فشار-سرعت استفاده شد. روش UPWIND مرتبه اول برای گسسته‌سازی جملات ممنتوم استفاده شد. در مورد گسسته‌سازی جملات توربولانس نیز دقیقاً مشابه فشار رفتار شد.

مدل پروانه

در این مقاله، از پروانه مدل موجود در آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد. مشخصات هندسی پروانه در جدول ۱ و نمای شماتیک آن در شکل ۱ آورده شده است. از نتایج تست این مدل در دستگاه تونل کاویتاسیون، برای مقایسه نتایج عددی و ارزیابی آن استفاده خواهد شد.

جدول ۱- مشخصات هندسی پروانه مدل

تعداد تیغه‌ها	قطر (متر)	نسبت توپی	اسکو (متر)	ریک (متر)
۴	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۰۱۳	۰/۰۲۸

تولید مش

برای تولید مش از گمبیت^۲، پیش پردازنده نرم‌افزار فلوئنت، استفاده شد. سطح تیغه‌ها با سلولهای مثلثی مش‌بندی شد [۷]. ناحیه نزدیک نوک، ریشه تیغه و لبه‌های تیغه با مثلث‌های کوچکتری با طول ضلع تقریبی $0.003D$ پر شد. D قطر پروانه است. نواحی داخلی روی تیغه با مثلث‌های بزرگتری پر شد که اندازه ضلعهای آن به تدریج و با نسبت رشد $1/0.5$ و $1/1.0$ رو به افزایش است. سرانجام ناحیه‌های باقی‌مانده در محدوده محاسباتی با



سلولهای چهار وجهی پر شد. شکل ۲ مش تولید شده را در سطح تیغه و شافت پروانه نشان می‌دهد. مش‌بندی تولید شده با این روش بعد از این در این مقاله به عنوان مش‌بندی اصلی شناخته می‌شود. نکته‌ای که در هنگام استفاده از مش‌بندی غیرساخت‌یافته باید رعایت کرد نسبت منطقی سلول استفاده شده است بطوریکه می‌تواند در نهایت در کیفیت کلی مش تولید شده و حتی نرخ همگرایی مسأله تأثیرگذار باشد. این امر موجب می‌شود که در لبه‌ها و نوک تیغه از تعداد مش بیشتری استفاده شود.

در مد محاسباتی پروانه مدل در دو وضعیت بررسی شد. در یک حالت پروانه به صورت کامل مدل گردید. در حالت دوم به علت تقارن موجود در هندسه، فقط یک تیغه بررسی شد. زاویه بین تیغه‌های جداکننده در این وضعیت 90° بود. علت ایجاد دو نوع شبکه محاسباتی مذکور بررسی نتایج در دو وضعیت مشروح، نرخ همگرایی، زمان‌بری CPU، و میزان اشغال حافظه متناظر است. وضعیت اول را مدل کامل و وضعیت دوم را مدل یک چهارم نامگذاری می‌کنیم. دو مدل مذکور به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است.

برای بررسی استقلال از شبکه، بنا بر استراتژی بالا، دو نوع مش‌بندی دیگر نیز تولید شد بطوریکه که اندازه سلولها به تدریج کاهش داده شد. تعداد سلولها با این روش برای مدل یک چهارم در حالت اول ۱۹۵۸۵۰ و در حالت دوم ۳۹۱۲۸۰ بود. مش حالت اول با نوع ۱ و حالت دوم با نوع ۲ نامگذاری شد. تعداد سلولها در مش‌بندی اصلی برابر ۱۱۹۷۳۶ بود. قابل توجه است که تعداد سلولها از یک نوع به نوع دیگر تقریباً دوبرابر می‌شود.

نتایج و مقایسه با داده‌ها

مدل مورد نظر در محدوده وسیعی از ضریب پیشروی، $j = \frac{V_a}{n.D}$ ، سرعت محوری جریان یکنواخت (متر بر

پایه) و n سرعت پروانه (دور بر ثانیه)، مورد بررسی قرار گرفت. ضریب پیشروی در بازه $0.7405 \leq j \leq 1.478$ قرار دارد. مقایسه J از طریق تغییر دادن سرعت محوری V_a از 0.5 تا $2/5$ بدست آمد. مقدار n در عدد $11/67$ ثابت بود.

شرایط مرزی مطابق با شرایط آزمایشگاهی تنظیم شد تا بتواند جریان اطراف پروانه را شبیه‌سازی کند. شرایط مرزی به صورت زیر تنظیم شدند. در مرز ورودی شرط جریان یکنواخت V_a ؛ روی سطح تیغه‌ها و توپی شرط عدم لغزش (سرعت صفر)؛ در مرزهای جانبی دوباره شرط جریان یکنواخت ورودی؛ در مدل یک چهارم شرط پیرودیک



پرخشی در مرزهای پرپودیک؛ و در مرز خروجی از شرط فشار ثابت برابر مقدار فشار کارکردی تونل استفاده شد. دلیل استفاده از شرط جریان ورودی در مرزهای جانبی این است که می توان از اثر دیواره بر روی جریان صرف نظر کرد. شرایط مرزی در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی استقلال از شبکه در مقدار $J=0.2956$ انجام شد. سه شبکه بندی مذکور در بالا مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲ - نتایج بررسی را بر حسب ضرایب گشتاور، $K_Q = \frac{Torque}{\rho_1 n^2 D^5}$ ، و نیروی تراست، $K_T = \frac{Thrust}{\rho_1 n^2 D^4}$ ، نشان می دهد.

ε تفاضل نسبی در حل بدست آمده در دو شبکه بندی مورد نظر است و به صورت $\varepsilon = \frac{(\varphi_{coarser} - \varphi_{finer})}{\varphi_{finer}}$ تعریف می شود

که $\varphi_{coarser}$ و φ_{finer} مقادیر حل در دو نوع شبکه بندی می باشند.

جدول ۲ - نتایج بررسی استقلال از شبکه

ε	K_Q	ε	K_T	
—	۸/۵۷	—	۲۱۰/۴۸	مش بندی اصلی
٪۳/۴	۸/۳۰	٪۰/۷۴	۲۰۸/۹۲	مش بندی نوع ۱
٪۴/۴۰	۷/۹۵	٪۰/۵۱	۲۰۷/۸۵	مش بندی نوع ۲

شکل ۵ - منحنی های K_Q و K_T را در مقابل J با مقادیر اندازه گیری شده متناظر نشان می دهد. در این منحنی ها برای مقایسه با داده های تجربی از مش بندی اصلی استفاده شده است. توافق خوبی بین دو مقدار برقرار است و روال شکل منحنی تجربی نیز بخوبی توسط نتایج عددی دنبال شده است. اما بنظر می رسد که نتایج CFD، اندکی مقادیر K_Q را بیشتر نشان می دهد. می توان علل امر را به صورت زیر بیان کرد. مهمترین دلیل اثر مقیاس جریان ویسکوز در پیش بینی کارکرد پروانه است. در حقیقت قسمت عمده مدل، حدود ۵۰٪ تا ۶۰٪، در محدوده جریان آرام است و مدل در مرحله انتقال توربولانس قرار دارد. اما در شبیه سازی های CFD فرض عمومی این است که جریان اطراف پروانه کاملاً آشفته است. چون هنوز یک مدل عمومی و پذیرفته شده برای مرحله گذر روی سطح تیغه وجود ندارد. عوامل دیگر می تواند عدم تطابق کامل شرایط آزمایشگاهی با مدل CFD باشد. عدم ریز بودن شبکه برای ورتکس نوک نیز ممکن است یکی از عوامل باشد [۷].



شکل- ۶ کانتور فشار را روی سطح پشتی تیغه در سه ضریب پیشروی ۰/۷۴۰۵، ۰/۵۱۷۲، ۰/۲۹۵۶ $J=$ و نشان می‌دهد. اگر حالت‌های (الف-) تا (ج-) را با یکدیگر مقایسه کنیم کاملاً واضح است که با کاهش J یا افزایش مقدار بارگذاری مقادیر فشار در سطح پشتی تیغه‌ها کاهش می‌یابند.

شکل- ۷ بردار سرعت را در اطراف پروانه در سرعت محوری ۱ متر بر ثانیه در مدل کامل نشان می‌دهد. از شکل نتیجه می‌شود که سیال بعد از عبور از پروانه افزایش سرعت پیدا می‌کند. همچنین بردارهای سرعت از طرفین به سمت تیغه‌ها کشیده می‌شوند.

مدل کامل از لحاظ زمان‌بری CPU و حافظه، دوبرابر مدل یک چهارم بود. ولی نسبت به مدل یک چهارم در تعداد دور کمتری همگرا شد. مش‌بندی کردن و تغییر اندازه مش در مدل یک چهارم به علت تعداد تیغه‌های کمتر راحت‌تر از مدل کامل بود.

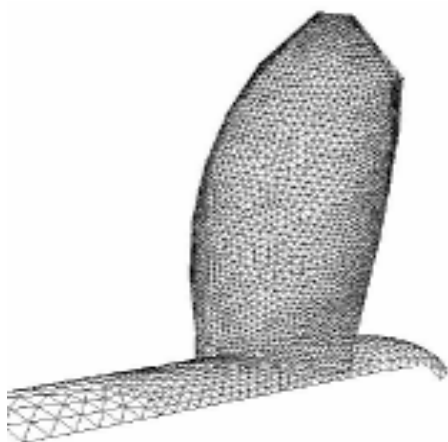
نتیجه‌گیری

نتایج حاصله را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد: مشخصات کارکردی پروانه‌های دریایی در شرایط آب آزاد توسط روشهای CFD قابل حصول هستند. نوع مش‌بندی (اندازه و تعداد سلولها، نوع المان و نوع مدل کردن) بسیار مهم بوده و همگرایی و نرخ آن و تا اندازه‌ای جواب نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در صورت زیاد نبودن حجم فایل کارکردی موردنظر استفاده از مدل کامل بهتر است.

می‌توان آزمایشهایی با وجود پروانه در پشت بدنه انجام داد و از نتایج حاصله برای تأیید نتایج عددی استفاده کرد تا در نهایت بتوان از روش عددی در تعیین مشخصات کارکردی کامل پروانه در میدان ویک شناور نیز استفاده نمود. از طرفی در توسعه مدل‌های توربولانس تلاش کرد تا مدل عددی به بهترین وجه مدل شود.

تشکر و قدردانی

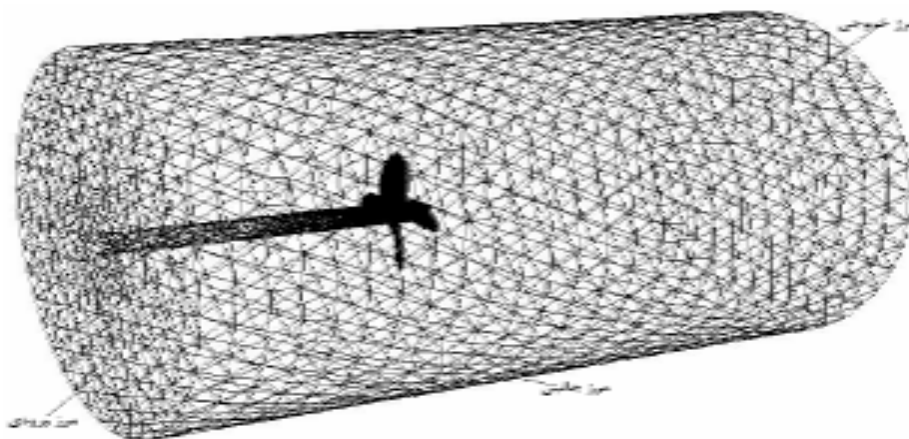
از همکاری مسئولین محترم آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی شریف آقایان دکتر سیف، مهندس عسگری و مهندس فراهانی در انجام این پروژه قدردانی می‌نمایم.



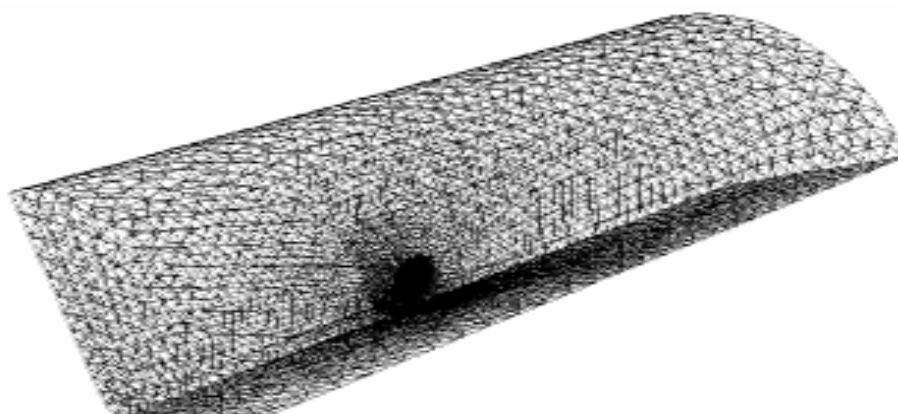
شکل-۲ مش سطحی برای پروانه



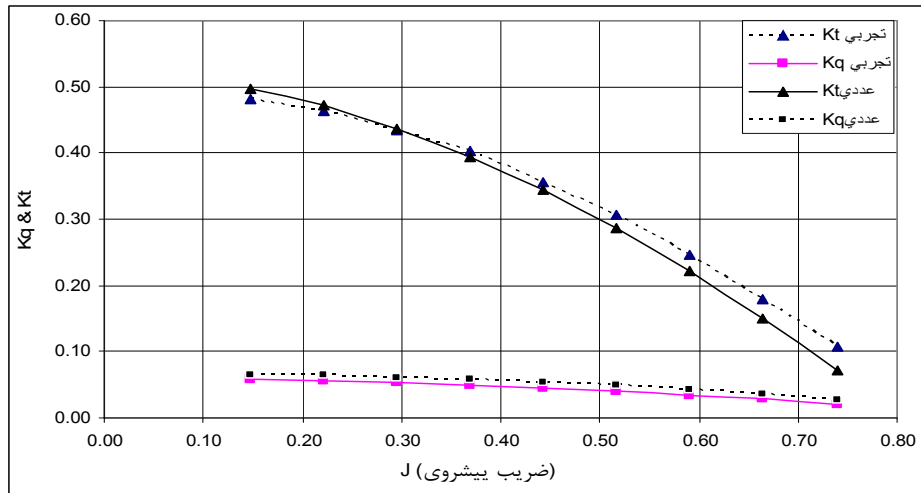
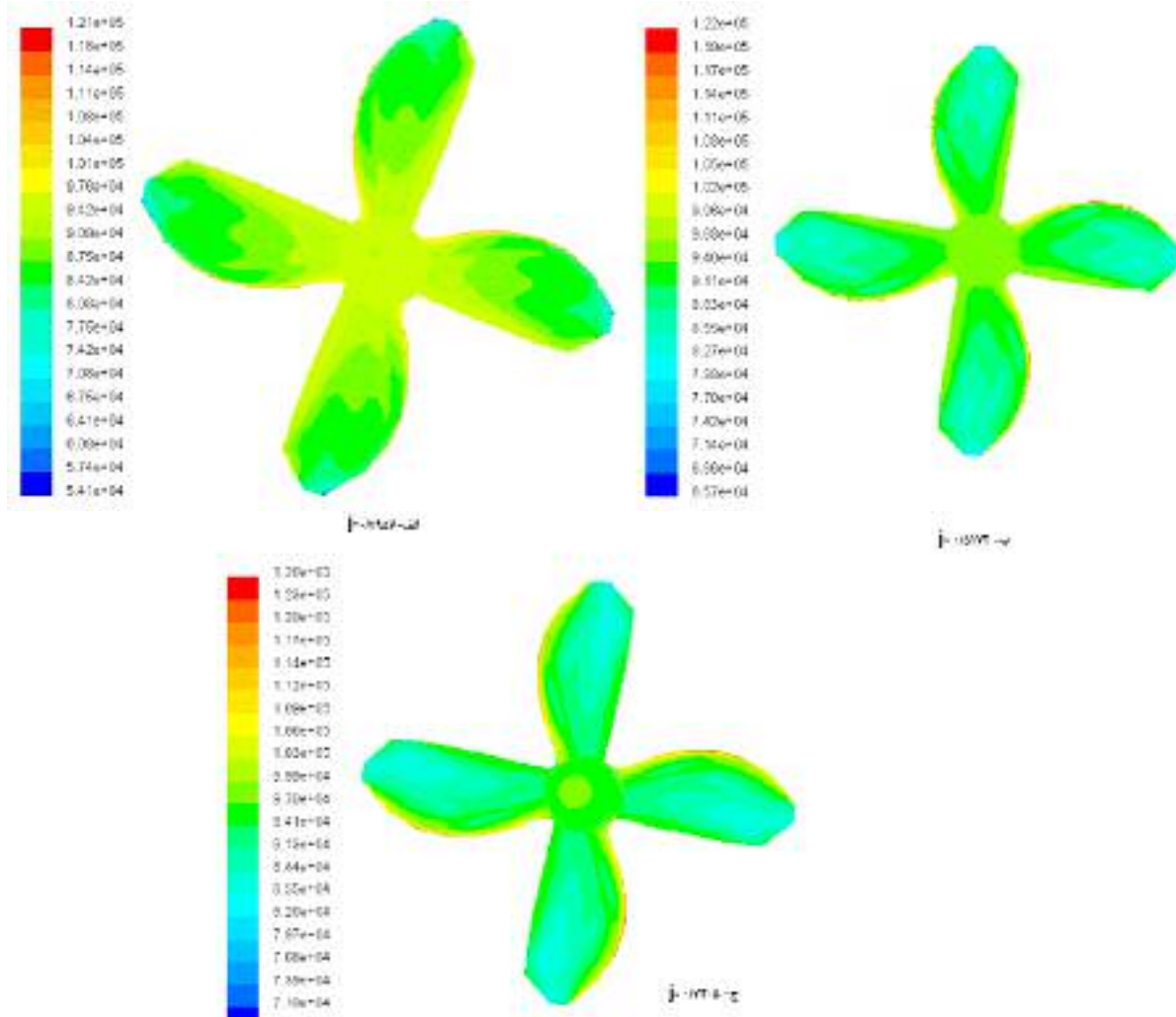
شکل-۱ هندسه شماتیک پروانه مدل

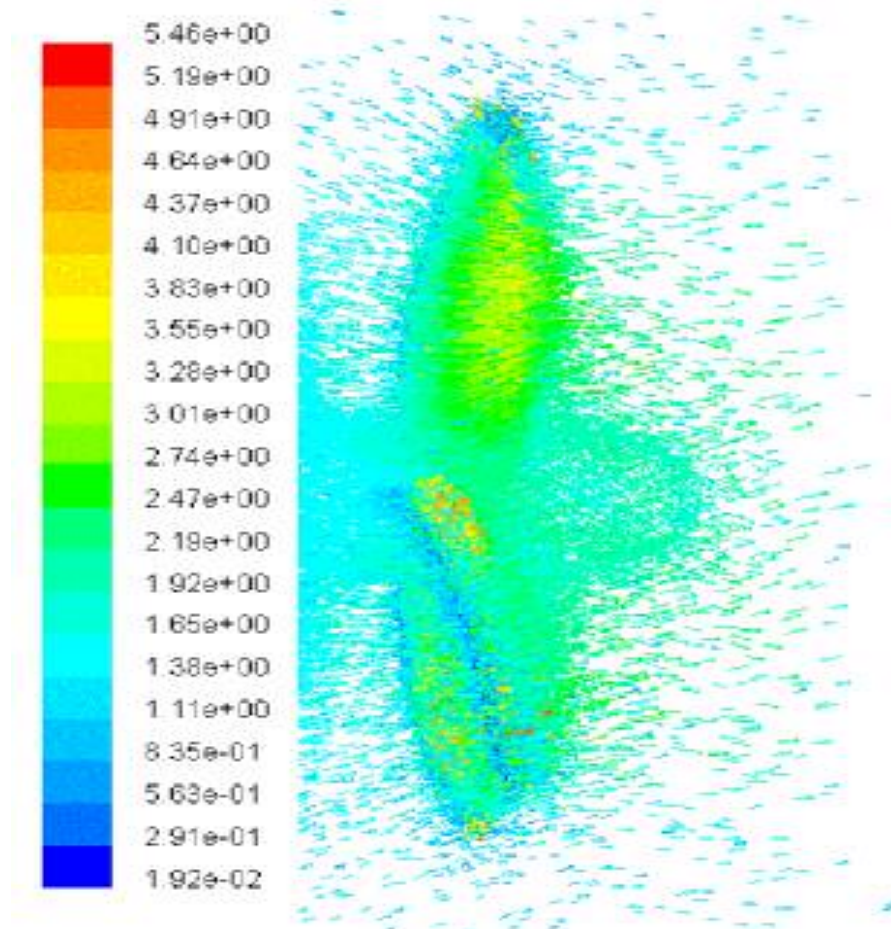


شکل-۳ جانمایی شبکه بندی کلی برای مدل کامل



شکل-۴ جانمایی شبکه بندی کلی برای مدل یک چهارم

شکل ۵- منحنی های K_Q و K_T در مقابل J شکل ۶ - کانتور فشار روی سطح پشتی الف - $J=0.2956$ ، ب - $J=0.5172$ ، ج - $J=0.7405$



شکل ۷- بردار سرعت در سرعت محوری ۱ (متر بر ثانیه) برای مدل کامل

مراجع

- ۱- قاسمی . حسن ، علیزاده. ولی الله ، "فرآیند و چگونگی تحلیل عددی پروانه کشتی با استفاده از نرم افزار فلوئنت" هفتمین همایش صنایع دریایی، انجمن مهندسی دریایی ایران، بهمن ۱۳۸۴.
- 2- Krasilnikov.V.I,Berg.A, Achkinadze.A.S,Stepanov.I.E "Interactive Program System for the Design/Analysis of Marine Propulsors", ISNAOE'03 - Shanghai, China - Sept 23-26, 2003.
- 3- Carlton.J.S, "Marine Propeller and Propulsion" Butterworth-Heinemann, London, 1994.
- 4- Watanabe.T ,et al, "Simulation of Steady and Unsteady Cavitation on a Marine Propeller Using a RANS CFD Code" Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
- 5- Julian.M.C, et al, " An Open Water Numerical Model for a Marine Propeller:A Comparison with Experimental Data", Proceedings of the ASME FEDSM'02, 2002 Joint US-European Fluids Engineering Summer Conference, July 14-18, 2002. Montreal, Canada.
- 6- Fluent Software V6.1, User's Guide.
- 7- Rhee.S.H, Kawamura.T, Li.H, "Propeller Cavitation Study using an Unstructured Grid Based Navier-Stoker Solver", ASME J. Fluids Eng.,Vol. 127, pp. 986-994.