

طراحی و بررسی جریان پایا و ناپایا حول پروانه باز و بسته در آب آزاد به وسیله مدل های SRANS و URANS

سعید کرمی*

علی ملکی

روح الله هادی پور گودرزی

ابراهیم علیزاده

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هیدرودینامیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، برای یک شناور سطحی پروانه استاندارد طراحی شد، سپس با یک برنامه کامپیوتری، هندسه سه بعدی پروانه بر مبنای داده های دوبعدی تولید و شبکه بندی و میدان جریان حول پروانه بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی حل گردید. در این راستا از شبکه بندی ترکیبی و شرط تناوبی بر مبنای برش اسپیلاین استفاده شد. در مدل سازی عددی از یک مدل پایا و سه مدل ناپایا استفاده شد. نتایج مورد اعتبارسنجی و عدم قطعیت خطای گسسته سازی شبکه بندی محاسبه گردید. نتایج دارای تطابق مناسبی با نتایج آب آزاد بود. نقطه جدایش جریان تخمین زده و دنباله پروانه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل سازی گذار لایه مرزی از دو مدل گذار گاما و گاما رینولدز تا استفاده شد. برای آشکارسازی گردابه و دنباله پروانه از معیار کیو استفاده گردید. جدایش جریان و گذار لایه مرزی از لایه ای به آشفته در روش ناپایا در ضرایب پیشروی بالا با حالات پایا متفاوت بود. اثرات افزودن دو مجرا استاندارد با کد ۱۹ و ۳۷ آ پروانه باز مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت که مجرای ۱۹ دارای خواص هیدرودینامیکی بهتری بود. **واژه های کلیدی:** پروانه دریایی، جریان دنباله پروانه، لایه مرزی لایه ای و آشفته، پروانه باز و بسته، دینامیک سیالات محاسباتی.

Design and Study of Steady and Unsteady Flow around Open and Close Marine Propeller by SRANS and URANS Models

S. Karami

A. Maleki

R. H. Godarzi

E. Alizade

Hydrodynamic Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Ship Architecture Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Ship Architecture Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this research, a standard propeller was designed for a surface vessel, then using a computer program, 3D propeller geometry based on two-dimensional data generated and gridding and flow field around the propeller was solved based on the computational fluid dynamics method. In this regard, we used a hybrid grid and periodic condition based on a spline Cutting. A steady model and three unsteady models were used in the numerical modeling. The results were validated and uncertainty grid discretization error was calculated. The results were in good agreement with the results of open water, an estimated separation point and propeller wake were investigated. In order to modeling the transition of the boundary layer, two models of $\gamma - Re\theta$ transition were used. The Q criterion was used to detection vortices and wakes. The separation of flow and transition of the boundary layer from laminar to turbulent in high advanced coefficients in the unsteady models was different of the steady model. The effects of adding two standard duct with 19A and 37A with open propeller were compared that 19A duct had better hydrodynamic properties.

Keywords: Marine Propeller, Propeller Wake, Laminar and Turbulent Boundary layer, Open and Close Propeller, Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

آزمایشگاهی و نیز نواقص موجود در این نظریه ها بیشتر در کارهای تحقیقاتی جهت طراحی پروانه ها استفاده می شود (۱، ۲). در روش دیگر که بر مبنای تست های آب آزاد است، سری های استاندارد با ویژگی های هندسی متفاوت در مقیاس مدل در آب آزاد آزمایش می شوند سپس مشخصات آن ها به صورت بی بعد شده رگرسیون ارائه و طراح می تواند با جستجو در مشخصات عملکردی این پروانه ها، پروانه ای که مشخصات آن با درخواست خود تطابق بیشتری دارد را انتخاب کند. پروانه های سری بی یکی از معروف ترین سری های طراحی پروانه است که در سال ۱۹۴۰ توسط تروست و همکاران در آزمایشگاه دریایی هلند طراحی و مورد آزمون قرار گرفتند. در سال ۱۹۸۱ برنیتساس و همکاران متحنی های عملکرد و مشخصات هندسی این پروانه ها را منتشر کردند (۳-۵). به طور کلی در دهه اخیر در بحث طراحی و تحلیل جریان

به منظور پیشروی یک شناور در دریا نیاز به یک نیروی پیش رانش است که بر مقاومت هیدرودینامیکی غلبه کند. پروانه یکی از مرسوم ترین سیستم های رانش دریایی است که همچنان فناوری طراحی آن ها در حال پیشرفت است. به طور کلی برای طراحی پروانه روش ها را می توان به دو دسته بندی تقسیم نمود. دسته اول شامل روش های عددی، تحلیلی و ترکیبی است که شامل: المان مرزی، خط برآ، سطح برآ، المان پره، ترکیب المان پره و ممنتوم و ترکیب روش های تحلیلی با روش های دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. در این روش ها به غیر از روش آخر، بر مبنای جریان پتانسیل بوده و اثرات لزجت سیال در نظر گرفته نمی شود و به علت نیازمندی به نتایج

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s_karami_mut_ac@dr.com

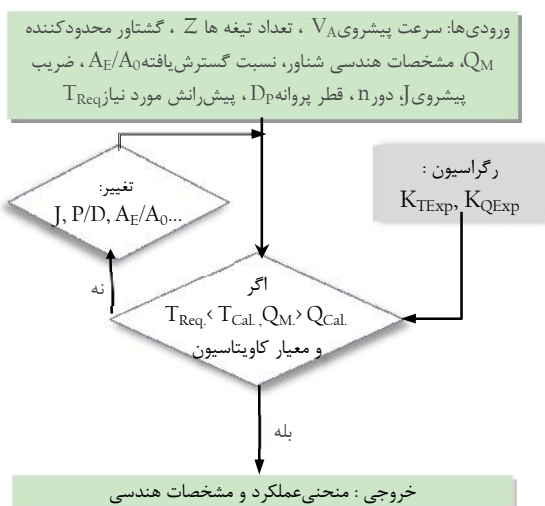
گذار در حوزه پروانه‌های دریایی محدود بوده و اکثر بررسی‌ها در حالت پایا و منحصر به بررسی منحنی‌های عملکرد است. در این تحقیق سعی شد انواع پارامترهای مهم در بررسی عملکرد پروانه‌های دریایی بررسی گردد. در بخش آخر نیز دو مجرا استاندارد بر روی پروانه طراحی شده قرارداد شده و نتایج با پروانه باز مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

۲- طراحی پروانه

به‌طور کلی طراحی پروانه یک فرآیند موازی با انتخاب موتور است یعنی هم‌زمان هنگام طراحی پروانه باید ملاحظات موتور از قبیل در دسترس بود تعمیرات، نگهداری و مشخصات موتور از قبیل دور، توان، گشتاور، نسبت جعبه‌دهنده و... را نیز باید در نظر گرفت. اولین گام در طراحی مشخص کردن محدوده پارامترهای طراحی است. این مقادیر را می‌توان با استفاده از روابط موجود به دست آورد و در نهایت طرح نهایی پروانه باید ۴ مؤلفه: نسبت سطح گسترش‌یافته، نیروی پیش‌رانش، گشتاور و بازدهی را با توجه به ملاحظات ارضاء کند. روند نمای طراحی پروانه به‌صورت شکل ۱ است. نسبت سطح گسترش‌یافته از معیار کلویتاسیون تأثیر می‌گیرد و طبق معادله (۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$A_E/A_0 \geq (1.3 + 0.3Z)T_p/D_p^2(P_0 - P_p) + k \quad (1)$$

که در آن Z تعداد تیغه پروانه، T_p نیروی پیش‌رانش فعال روی هر پروانه، D_p قطر پروانه، P_0 فشار هیدرواستاتیکی روی پروانه از سطح آزاد تا خط شفت، P_p فشار بخار آب و k ضریب اطمینان است.



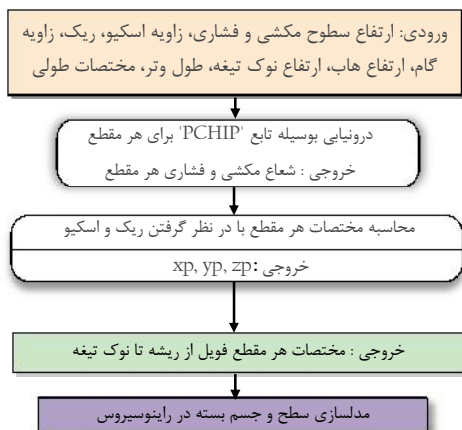
شکل ۱- روند نمای طراحی پروانه به روش سری استاندارد

مقدار پیش‌رانش باید با پیش‌رانش محاسبه شده برابر یا با اختلاف ۵ درصدی بیشتر از پیش‌رانش درخواستی باشد. گشتاور موتور از روی دور موتور و توان آن قابل محاسبه است و گشتاور محاسبه شده پروانه به دلیل ملاحظات بارگذاری سازهای باید از گشتاور محدود شده موتور کمتر باشد. در رابطه با بازدهی نیز در نقطه عملکرد موردنظر باید بازدهی نزدیک به قله نمودار طراحی باشد. قطر پروانه با توجه به ملاحظات پاشنه تعیین می‌شود که براساس استانداردها مقادیر آن ذکر شده است. C_B ، ضریب بلوکی شناور جز خواص هندسی شناور است. تعداد تیغه پروانه بر مبنای فرکانس ارتعاشی موتور و بدنه در نظر گرفته

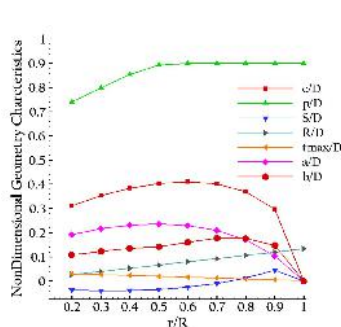
حول پروانه‌های دریایی مطالعات زیادی صورت گرفته است. در مورد روش‌های عددی و تحلیلی می‌توان به [۲، ۶] رجوع نمود و در رابطه با طراحی پروانه به روش سری می‌توان به [۷، ۸] مراجعه نمود. نژان و همکاران [۹] الغرب [۱۰] جریان حول پروانه سری بی را شبیه‌سازی و نتایج خود را مورد اعتبارسنجی قرارداد. حیاتی و همکاران [۱۱] عملکرد پروانه سری بی را در حالت پایا در پشت یک وسیله پیش‌برنده خودمختار در زوایای حمله مختلف بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در زوایای حمله بالاتر نیروی پیش‌رانش بیشتر ولی در مقابل گشتاور و توان بیشتری نیاز است. پایک [۱۲] و ولی [۱۳] عملکرد یک پروانه در نزدیکی سطح آزاد را با نسبت‌های غوطه‌وری مختلف مورد بررسی قراردادند. گردابه نوک تیغه بر روی الگوی سطح آزاد تأثیر زیادی داشت. بوکتا و عمر [۱۴] به‌صورت پارامتری تأثیر پارامترهای هندسی را روی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های سری DTMB بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند افزایش ضخامت و پروانه با ۴ تیغه و اسکینو منفی باعث افزایش بازدهی می‌شود. چامزرا و همکاران [۱۵] جریان حول یک پروانه کورت نازل را به‌وسیله مدل‌های آشفتگی مختلف بررسی کردند که دقت مدل RSM بالاتر بود. آریف و همکاران [۱۶] اثر قطر نازل به طول مجرا و تغییرات لقی نوکی تیغه را برای پروانه‌های سری کاپلان بررسی و چند حالت بهینه را پیشنهاد کردند. بررسی جریان در لایه‌مرزی موضوع مهمی در اجسام خط جریانی است. به‌طور کلی در لایه‌مرزی پروانه‌های دریایی باید اثرات جدایش جریان در لایه‌مرزی را بررسی و مدل‌سازی نمود. گذار لایه‌مرزی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی روی رفتار جدایش جریان لایه‌مرزی داشته باشد. مدل گاما گذار در سال ۲۰۰۴ برای اولین بار برای کدهای CFD ارائه شد با تجریا و همکاران [۱۷] مدل آشفتگی همراه با گذار را برای یک پروانه دریایی اعتبار سنجی نمودند. نتایج مدل گذار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بود. آن‌ها دریافتند که مدل گذار در بارگذاری‌های سنگین عملکرد مؤثرتری دارد.

اغلب مدل‌های آشفتگی در دینامیک سیالات محاسباتی برای جریان‌های کاملاً آشفته مناسب هستند که موجب کاهش دقت در پیش‌بینی مشخصات عملکردی می‌شوند. اختلاف بین گشتاور و نیروی پیش‌رانش محاسبه شده و داده‌های آزمایشگاهی با افزایش بارگذاری پروانه بیشتر می‌شود. این ناشی از این واقعیت است که یک ناحیه جریان لایه‌ای بزرگ وجود دارد و گذار آشفتگی بر روی تیغه پروانه و شرایط بارگذاری سنگین وجود دارد. در این حالت ضروری است که گذار لایه‌مرزی نیز بررسی گردد. وانگ و والترز [۱۸] شبیه‌سازی جریان برای یک پروانه دریایی با استفاده از مدل آشفتگی گذار به‌منظور به دست آوردن نتایج دقیق‌تر بررسی کردند. شبیه‌سازی‌های جریان کاملاً آشفته نیز به‌منظور مقایسه انجام شد. نتایج مدل همراه با مدل‌سازی گذار دقیق‌تر بود. طراحی، مدل‌سازی هندسی و بررسی عددی میدان جریان حول پروانه‌های دریایی بخش مهمی از روند طراحی سیستم رانش شناور و درک عملکرد هیدرودینامیکی پروانه است. به‌طور کلی انتخاب روش عددی با توجه به درجه انتظار از دقت می‌تواند متفاوت باشد از آنجایی که بیشتر پدیده‌ها در پروانه‌های دریایی از قبیل دنباله‌ها، جدایش جریان، گذار لایه‌مرزی ذاتاً ناپایدار است بررسی روش‌های گذار در بررسی جزئی‌تر طراحی بسیار سودمند است. به‌طور کلی با بررسی منابع مختلف شبیه‌سازی جریان با در نظر گرفتن پدیده‌های

مختصات سه‌بعدی نقاط هر مقطع (x_p, y_p, z_p) مشخص و در نهایت در محیط مدل‌سازی رایونوسیروس هندسه جامد پروانه تولید شد. در شکل ۳ مشخصات هندسی پروانه طراحی شده به صورت بهنجار شده با قطر نشان داده شده است.



شکل ۲- روند نمای تولید هندسه پروانه



شکل ۳- مشخصات هندسی پروانه

در جدول ۱ مشخصات کلی هندسه پروانه ارائه شده است

| جدول ۱- مشخصات هندسه پروانه | |
|-----------------------------|-------------------|
| مقدار | پارامتر |
| گام ثابت | نوع پروانه |
| ۱/۸ متر | قطر پروانه |
| ۰/۷۵ | نسبت گسترش یافته |
| ۴ | تعداد تیغه |
| ۰/۹ | نسبت گام به قطر |
| ۰/۱۶۷ | نسبت هاب به قطر |
| ۰/۷۲۳ متر | وتر در ارتفاع ۰/۷ |
| سری بی | نوع مقطع |
| راستگرد | جهت چرخش |
| ۱۵+ درجه | ریک |

۳- مدل‌سازی عددی

۱-۳- معادلات حاکم

به منظور مدل‌سازی عددی باید معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته حل شوند که شامل معادله پیوستگی و معادلات میانگیری شده سه بعدی ناویر استوکس است. خواننده برای اطلاعات بیشتر به

می‌شود. بدین منظور برای موتورهای با تعداد سیلندر فرد تعداد پره زوج و بالعکس در نظر گرفته می‌شود. V_s و R_s سرعت و مقاومت شناور، V_A سرعت پیشروی یعنی سرعت ورود به صفحه پروانه که به وسیله معادله (۲) محاسبه و در فرآیند طراحی در نظر گرفته می‌شود.

$$V_A = V_s(1 - W) \quad (2)$$

W فاکتور ویک بوده که اختلاف خواص جریان ورودی به سینه شناور و ورودی به صفحه پروانه و تأثیر بدنه بر محیط عملکرد پروانه است و به وسیله معادله تجربی (۳) محاسبه شد.

$$W = [0.71 - 2.39C_B + 2.33C_B^2] + [0.12C_B^4(6.5 - L/B)] \quad (3)$$

T_{Req} پیش‌رانش درخواستی شناور از پروانه است که به وسیله معادله (۴) به دست می‌آیند.

$$T_{Req} = R_s/Z_s(1 - t) \quad (4)$$

در معادله (۴) فاکتور کاهش جلوبرندگی بوده که ناشی از افزایش سطح خیس خود پروانه و میدان فشار پشت پروانه بین بدنه و پروانه است و به وسیله معادله تجربی (۵) محاسبه شده است. در این رابطه B و T به ترتیب عرض و آب‌خور شناور هستند. Z_s تعداد خط شفت است [۱۹].

$$t = 0.325C_B - 0.1885 \frac{D_p}{\sqrt{BT}} \quad (5)$$

پس از تعیین پارامترهای ذکر شده n یک دور حدس زده شده و J ضریب پیشروی محاسبه می‌شود و این مقادیر به عنوان ورودی به نرم‌افزار Persian Gulf داده شده و پس از جستجو در نمودارهای بی‌بعد شده عملکرد پروانه، نرم‌افزار مشخصات هندسی و هیدرودینامیکی پروانه را ارائه می‌دهد. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه با استفاده از روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند که به ترتیب شامل: پیش‌رانش، گشتاور و بازدهی هستند. ضریب پیشروی به صورت معادله (۹) است

$$K_{TP} = T_p / \rho n_p^2 D_p^4 \quad (6)$$

$$K_{QP} = Q_p / \rho n_p^2 D_p^5 \quad (7)$$

$$\eta_0 = J / 2\pi \cdot K_{TP} / K_{QP} \quad (8)$$

$$J = V_A / n_p D_p = V_s(1 - W) / n_p \cdot D_p \quad (9)$$

۲-۱- مدل‌سازی هندسی پروانه

طراحی هندسی پروانه‌های دریایی موضوع مهمی در طراحی پروانه و درک عملکرد هیدرودینامیک دارد. به منظور انتخاب مناسب یک پروانه با بازدهی بهینه، فرم مقطع تیغه باید با دقت در نظر گرفته شود به علاوه توزیع گام، ریک در جهت شعاعی نیز مهم هستند. فرم هندسی یک پروانه دریایی از سطوح منحنی‌وار مختلفی تشکیل شده است: سطح منحنی شده تیغه، سطح استوانه‌ای هاب و سطح متصل‌کننده این دو [۱، ۲۰، ۲۱]. روش استفاده شده در این تحقیق بر مبنای روابط مرجع کتاب [۱] است. روند نمای تولید هندسه به شکل ۲ است. ورودی شامل: Y_l و Y_u که به ترتیب ارتفاع سطوح کم‌فشار و پرفشار مقطع ایرفویل، $tetaS$ مقدار زاویه اسکیو، iG مقدار فاصله ریک، $tetaNT$ زاویه گام پروانه، c وتر، y_h ارتفاع هاب، y_c ارتفاع نوک تیغه، X_c مختصات طولی وتر متناظر با ارتفاع سطوح مکشی و فشاری و x مختصات شروع و پایان هاب تیغه است. پس از میانبایی نقاط بر روی هاب سپس

مرجع [۲۲] مراجعه نماید.

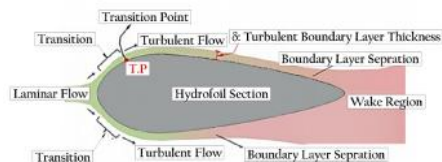
۲-۳- معادلات آشفتگی

به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر جریان نزدیک دیواره از مدل آشفتگی SST استفاده شده است. این مدل آشفتگی ترکیبی از دو معادله $K-\omega$ و $K-\varepsilon$ است که اولین بار توسط منتر در سال ۱۹۹۳ ارائه شد. چون مدل $K-\omega$ جزء مدل‌های رینولدز پایین بوده در نواحی دور از دیواره به علت تأثیر گرفتن از شرایط بالادست جریان خطای بیشتری دارد به همین دلیل از این مدل در نواحی نزدیک دیواره و از مدل $K-\varepsilon$ در نواحی دور از دیواره استفاده می‌شود. مدل SST در پیش‌بینی زمان جدایش لایه‌مرزی از روی سطوح از مدل $K-\varepsilon$ قوی‌تر است. ارتباط بین این دو معادله توسط دو تابع ترکیب F_1 و F_2 برقرار می‌گردد [۲۳].

۳-۳- مدل‌سازی جریان گذار لایه‌مرزی و گردابه

به‌طور کلی جریان روی هر جسمی دارای سه ناحیه است: جریان لایه‌ای، گذار و آشفتگی. پروانه‌های دریایی معمولاً از مقاطع استاندارد خط جریانی استفاده می‌کنند. اگر یک مقطع هیدروفویل را به صورت شکل ۴ در نظر بگیریم و جریان از سمت چپ وارد شود پس از رسیدن جریان به لبه حمله یک ناحیه لایه‌ای با خطوط منظم لایه‌ای داریم پس از پیشروی سیال به پایین‌دست‌تر یک ناحیه با طول کمتر تحت عنوان گذار لایه‌ای به آشفتگی وجود دارد که در آن ناپایداری‌های جریان شروع به رشد نموده و سپس ناحیه آشفتگی به وجود می‌آید. همان‌طور که بر روی شکل ۴ نشان داده شده به‌طور تخمینی می‌توان یک نقطه را به‌عنوان گذار لایه‌ای به آشفتگی تخمین زد که بر روی شکل با TP نشان داده شده است. در این نقطه ضخامت ناحیه مرز لایه‌مرزی رشد کرده و ضخیم‌تر می‌شود که در شکل با نماد δ نشان داده شده است. در این نقطه معمولاً سرعت به مقدار ۹۹ درصد سرعت جریان خارج لایه‌مرزی می‌رسد. امروزه اغلب مدل‌های آشفتگی آغاز گذار لایه‌مرزی از لایه‌ای به آشفتگی را مدل‌سازی نمی‌کنند. اخیراً به‌منظور پیش‌بینی شروع گذار جریان لایه‌ای به آشفتگی از یک مدل آشفتگی دیگر نیز به همراه مدل آشفتگی SST برای حل میدان جریان استفاده می‌کنند که به‌صورت کوپل با یکدیگر حل می‌شوند. دو مدل: گذار گاما^۲ و گاما رینولدز^۳ اولین بار توسط منتر [۲۴] در سال ۲۰۰۴ معرفی گردیده است. مدل اول یک مدل تک معادله‌ای و ساده‌شده از مدل گاما رینولدز است که هزینه محاسباتی کمتری دارد. مدل دوم دارای دقت بیشتر و زمان حل بالاتر است. پیش‌بینی گذار در شبیه‌سازی جریان در پروانه‌های دریایی می‌تواند بر روی نتایج تراست و گشتاور تأثیر بگذارد [۱۸]. در شبیه‌سازی صورت گرفته از دو مدل ناپایا گذار گاما و گاما رینولدز^۳ تا [۲۵] برای شبیه‌سازی استفاده شد. به‌منظور همگرایی سریع‌تر در حل عددی صورت گرفته حل پایا به‌عنوان حدس اولیه برای شبیه‌سازی ناپایا استفاده گردید. در مدل‌سازی ناحیه گذار برای حدس اولیه ضخامت لایه‌مرزی آشفتگی از معادله تخمینی (۱۰) [۲۶] استفاده شده که متناسب با هر ضریب

پیشروی در حلگر وارد گردید. در معادله (۱۰) c و Re به ترتیب وتر مقطع و عدد رینولدز در ارتفاع 0.7 پروانه است.



شکل ۴- لایه‌مرزی حول یک مقطع خط جریانی

$$\delta/c_{0.7} = 0.16/\sqrt[7]{Re_{blade@0.7R}} \quad (10)$$

به‌طور کلی آشکارسازی میدان گردابه از مباحث پیچیده در مکانیک سیالات است. روش‌های مختلفی برای توصیف و به تصویر کشیدن گردابه‌ها وجود دارد. طبق تعریف لمب در سال ۱۹۴۵، یک گردابه را می‌توان به‌صورت یک لوله که سطح این لوله را خطوط گردابه می‌سازند توصیف کرد [۲۷]. لاگت در سال ۱۹۷۹ گردابه را انبوهی از ذرات سیال که حول یک مرکز مشترک می‌چرخند، توصیف کرد [۲۸]. هانت و همکاران گردابه را ناحیه‌ای معرفی می‌کنند که هم در آن نامتغیرهای دوم تانسور گرادیان سرعت مثبت باشند و هم فشار کم باشد [۲۹]. براساس تعریف جانگ و همکاران ناحیه‌ای است که در آن مقادیر ویژه-ی تانسور گرادیان سرعت مختلط هستند [۳۰]. براساس تعاریف ذکر شده روش‌های مختلفی برای آشکارسازی جریان آشفتگی تراکم ناپذیر و گردابه‌ها وجود دارد. در این مقاله از معیار Q بر مبنای تعریف هانت استفاده شده است. در این روش نامتغیر دوم تابع گرادیان سرعت براساس آهنگ چرخش و کرنش با استفاده از رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$Q = 1/4(\omega_{ij}^2 - 2S_{ij}^2) \quad (11)$$

که S تانسور نرخ کرنش و ω بردار سرعت زاویه‌ای است. پارامتر Q بیانگر ناحیه‌ای از میدان جریان سیال است که مقدار گردابی از مقدار نرخ کرنش بزرگ‌تر می‌شود. معمولاً این کمیت در ناحیه میدان حل، به‌صورت صفحات با مقدار ثابت از Q نشان داده می‌شود.

۴-۳- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

به‌منظور شبکه‌بندی حول پروانه از شبکه‌بندی ترکیبی استفاده شد که برای ناحیه دوار از شبکه‌بندی شش‌وجهی با سازمان استفاده شد، در شبکه‌بندی با سازمان از روش بلوک‌بندی با بلوک‌های C شکل در لبه حمله و فرار و بلوک O شکل حول سطوح مکش و فشار استفاده گردید. برای ناحیه ثابت از شبکه‌بندی بی‌سازمان چهاروجهی برای دیواره‌های تناوبی و برای هسته از شبکه‌بندی دکارتی استفاده گردید. در شبکه‌بندی دکارتی ضلع‌های هر حجم کنترل عمود بر محورهای مختصات است. تأثیرات لایه‌مرزی، با ایجاد شبکه متراکم در نزدیکی دیواره‌ها مدنظر قرار گرفته است. در شکل ۵ آرایش بندی بلوک‌ها نشان داده شده است. شرایط مرزی استفاده شده به‌طوری در نظر گرفته شده که اثرات دوردست و جریان بازگشتی در ورودی و خروجی بر روی همگرایی حل تأثیری نگذارند. به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی شرایط مرزی استفاده شده از نوع تناوبی [۳۱] براساس برش اسپیلاین [۳۲]

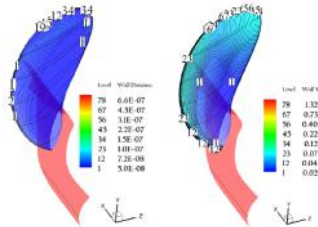
1 Transition Point
2 Gamma Transition
3 $\gamma - Re\theta$ Gamma

بدین منظور پس از شبیه‌سازی و بررسی خروجی‌ها اگر مقدار پارامتر Y^+ محاسبه شده کمتر از ۱ بود این شرایط ارضاء شده و می‌توان گفت که جدایش جریان نزدیک دیواره‌ها به صورت صحیح مدل‌سازی شده است. فاصله بی‌بعد از دیواره طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$y^+ = (\rho u_\tau \Delta y) / \mu \quad (12)$$

$$u_\tau = (\tau_\omega / \rho)^{1/2} \quad (13)$$

در معادله (۱۳) u_τ سرعت اصطکاک، τ_ω تنش برشی دیواره و ρ چگالی سیال است. در شکل ۷ فاصله مرکز اولین سلول محاسباتی از دیواره و مقادیر Y^+ حول سطوح مکشی و فشاری و هاب نشان داده شده است.



شکل ۷- خطوط هم‌تراز چپ) فاصله سلول اول محاسباتی از دیواره (راست) مقدار Y^+

جدول ۴- شرایط شبیه‌سازی عددی

| ضریب | سرعت ورودی m/s | سرعت دورانی rpm | عدد رینولدز دورانی (10^6) | عدد رینولدز تیغه (10^6) |
|-------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| ۰/۴۵۴ | ۲/۱۷ | ۱۹/۴۷۷ | ۱/۱۳ | ۱/۰۲ |
| ۰/۵۸۱ | ۲/۹۵۱ | ۲۰/۰۷۱ | ۱/۱۷ | ۱/۰۶ |
| ۰/۷۲۵ | ۴/۷۹۴ | ۲۶/۴۲۲ | ۱/۵۴ | ۱/۴۳ |
| ۰/۷۴۴ | ۵/۹۰۲ | ۳۱/۷۲۸ | ۱/۸۵ | ۱/۷۲ |

۴- نتایج

۴-۱- اعتبار سنجی

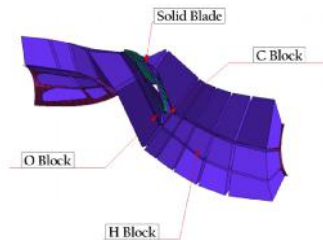
در این قسمت به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی پروانه DTMB 4119 در ضریب پیشروی ۰/۸۳۳ با سه شبکه بررسی و شبیه‌سازی شد (جدول ۵). شرایط مرزی از نوع تناوبی و ابعاد شرایط مرزی طبق شکل ۶ استفاده گردید. برای اطلاعات بیشتر به مراجع [۳۳-۳۵] رجوع شود.

جدول ۵- نتایج عددی برای سه شبکه متفاوت مقایسه با نتایج

| آزمایشگاهی پروانه DTMB4119 برای $J=0.833$ | | | |
|---|--------|---------|---------|
| Grid Types | Count | Kt | Kq |
| Fine | ۱/۰۰۲M | ۰/۱۳۴۱۸ | ۰/۰۲۵۸۵ |
| Medium | ۷۱۳ K | ۰/۱۳۴۱۷ | ۰/۰۲۵۷۵ |
| Coarse | ۵۰۴ K | ۰/۱۳۳۷۷ | ۰/۰۲۵۶۲ |
| Exp[33] | - | ۰/۱۴۶۸ | ۰/۰۲۶۴ |
| diff.=[Num-Exp]/Exp * 100 | - | -۸/۵۹% | -۲/۰۵% |

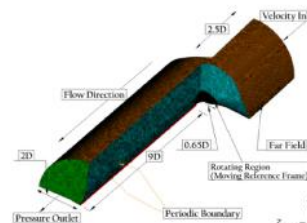
به منظور مدل‌سازی جریان اطراف پروانه طبق جدول ۴ ضرایب پیشروی مورد نظر شبیه‌سازی و در جدول ۸ با نتایج آب آزاد [۳] مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و خطای ضرایب هیدرودینامیکی به دست آمد. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مقاله شامل یک روش پایا

استفاده شد. در این روش دامنه محاسباتی براساس منحنی اسپیلاین و متناسب با زاویه اسکیو و گام ایجاد می‌شود. در شکل ۶ شرایط مرزی و دامنه محاسباتی نشان داده شده است.



شکل ۵- بلوک‌بندی شبکه

به منظور تنظیم دقیق‌تر فاصله مرکز اولین سلول از دیواره از رابطه تجربی شلیختینگ [۲۶] برای تخمین استفاده شد. مقدار این فاصله در جدول ۲ ارائه شده است. فاصله مرکز اولین سلول از دیواره براساس سرعت دورانی در ارتفاع ۰/۷ تیغه و سرعت جریان آزاد محاسبه و در توزیع شبکه‌بندی در نظر گرفته شد.



شکل ۶- شرایط مرزی دامنه محاسباتی

جدول ۲- فاصله مرکز اولین سلول محاسباتی تا دیواره

| براساس پارامتر | مقدار | فاصله از دیواره (10^{-3}) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|
| سرعت جریان آزاد | ۵/۹۰ متر بر ثانیه | ۳/۲۷ |

شبکه‌بندی در نرم‌افزار آی سم سی اف دی نسخه ۱۷/۰ تولید شده است. در این نرم‌افزار می‌توان چگالی شبکه‌بندی را در هر ناحیه‌ای از دامنه محاسباتی به طور دقیقی کنترل نمود. با استفاده از معیارهای شبکه‌بندی سلامت شبکه بررسی و تایید شد.

۳-۵- شرایط شبیه‌سازی و حساسیت حل به شبکه‌بندی

از آنجایی که قطر پروانه طراحی شده در مقیاس واقعی و دامنه محاسباتی و در نتیجه هزینه محاسباتی بیش از حد و مقرون به صرفه نبود. بدین منظور با استفاده اعداد بی‌بعد فرود و ضریب پیشروی مقیاس شده و دورها و سرعت ورودی متناظر در نظر گرفته شد. قطر پروانه مدل‌سازی شده ۰/۲۵ متر است. برای بررسی استقلال از شبکه ۵ تراکم شبکه به وسیله ضرایب بی‌بعد شده هیدرودینامیکی تراست و گشتاور بررسی شد. تأثیرات لایه مرزی، با ایجاد شبکه متراکم در نزدیکی لبه‌های حمله و فرار مدنظر قرار گرفت. در شبکه ۴ و ۵ تغییرات ناچیز بود بنابراین از شبکه ۴ با تعداد المان ۱/۷۵ میلیون استفاده گردید. از آنجایی که بررسی حاضر جریان نزدیک دیواره مهم است. به منظور بهتر مشاهده نمودن جدایش جریان، با ایجاد تراکم بیشتر شبکه در نزدیک دیواره‌ها گره اول هر سلول باید در زیر لایه ویسکوز قرار بگیرد،

| | | |
|-----------|----------|----------------------|
| ۰/۰۱۸۲ | ۰/۱۰۹۸ | φ_2 |
| ۰/۰۱۲۴ | ۰/۰۵۲۲ | φ_3 |
| ۸/۵۴۴۴ | ۱۸/۱۸۶۰ | p |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۱۰۹۹ | φ_{ext}^{12} |
| ۰/۰۱۶۲ | ۰/۰۰۰۹ | e_a^{21} |
| ۸/۷۱E-۴ | ۱/۶۱E-۶ | e_{ext}^{21} |
| ۱/۰۸۲E-۱% | ۲/۰۲E-۴% | GCI_{fine}^{21} |

۳-۴- جریان گذار و دنباله جریان

در نزدیکی دیواره پروانه سرعت سیال ناچیز است. بنابراین نیروهای لزجی قوی تر و عدد رینولدز درون لایه مرزی ناچیز است. یک پارامتر مناسب که به وسیله آن می توان نقطه جدایش جریان را مشخص کرد نسبت لزجت آشفتگی است که به وسیله نسبت μ_t/μ تعریف می شود که μ_t لزجت آشفتگی و برابر با $\mu_t = \rho k T$ است، ρ چگالی سیال، k انرژی جنبشی آشفتگی و T مقیاس زمانی آشفتگی است [۲۵]. μ لزجت سیال در حالت لایه ای سیال است. در ناحیه زیر لایه ورقه ای جریان آشفتگی پارامتر TVR کوچک و نزدیک به صفر و جایی است که آشفتگی نداریم. با توجه به شکل ۱۰ نقطه گذار جریان به صورت تخمینی بر روی خطوط هم تراز برای چهار مدل شبیه سازی شده نمایش داده شده است. از آنجایی که مقطع ۰/۷ شعاع پروانه ویژگی های تمام مقاطع پروانه را به صورت بهتری ارائه می دهد ارزیابی برای ارتفاع ۰/۷ شعاع انجام شده است. در جدول ۷ موقعیت مکانی نقطه گذار بصورت تخمینی روی سطوح مکشی و فشاری به عنوان درصدی از وتر ارائه شده است. در ضریب پیشروی ۰/۴ در روش پایا SRANS چون اثرات گذار کاملاً مدل سازی نشده است طول نقطه جدایش جریان کمتر از سایر روش ها است و جدایش جریان را زودتر و نزدیک تر به لبه حمله پیش بینی می کند. در روش IUWT نیز که جزء روش های ناپایا است ولی چون معادله گذار لایه مرزی حل نشده است باز هم نتایج مقدراری بهبود ولی باز هم نزدیک به روش پایا پیش بینی شده است. در روش های گذار IUGT ضرایب هیدرودینامیکی با دقت بیشتری پیش بینی شده اند و جدایش جریان را نیز با تأخیر بیشتری پیش بینی نموده اند. با افزایش ضریب پیشروی در ۰/۷ اثر گذار بر روی سطح پروانه کمتر می شود و تشخیص جدایش جریان دشوارتر می شود و طول نقطه گذار به سمت لبه فرار گرایش یافت، بنابراین مدل های گذار بیشتر برای شرایط بارگذاری سنگین بکار می آیند. چون در شرایط بارگذاری سنگین لایه مرزی آرام بزرگتر و تغییرات لایه مرزی به وسیله این روش بهتر قابل شناسایی هستند. مدل IUGRT دارای پیش بینی دقیق تری از این نقاط بوده و می توان گفت که مدل دقیق تری است. به طور کلی در بارگذاری های سبک چون مؤلفه فشاری بیشتر از مؤلفه لزج می گردد تغییرات درون لایه مرزی کمتر و تشخیص گذار لایه مرزی دشوارتر است.

SRANS^۱ و سه روش ناپایا IUWT^۲، IUGT^۳ و IUGRT^۴ است. به منظور پایداری بیشتر در شبیه سازی های گذرا، گام زمانی طوری در نظر گرفته شد که عدد کورانت کمتر از یک ایجاد شود. عدد کورانت نشان دهنده جابجایی یک ذره سیال از یک سلول به سلول دیگر است که اگر کوچک تر از ۱ باشد ذره سیال در یک گام زمانی از یک سلول به سلول دیگر جابجا می گردد. این عدد به سرعت، اندازه خطی سلول و گام زمانی وابسته است [۲۲]. با توجه به جدول ۸ نتایج روش های همراه با گذار لایه مرزی به نتایج تجربی نزدیک تر بودند. شبیه سازی صورت گرفته به وسیله کد تجاری استارسی سی ام^۵ ورژن ۲/۰۲ صورت گرفته است. تمام فرآیند شبیه سازی و پس پردازش به صورت خودکار و به وسیله زبان ماکرو انجام شده است.

۴-۲- عدم قطعیت

مطالعه تأیید به منظور اطمینان از نتایج حلگر و کیفیت شبکه بندی صورت می گیرد. در این پژوهش از شاخص GCI یا شاخص همگرایی شبکه استفاده شد. این مدل براساس برونمایی ریچاردسون [۳۶، ۳۷] است و برای تخمین خطای گسسته سازی از آن استفاده شده است. در این روش با استفاده از نتایج عددی سه شبکه بندی متفاوت و با آهنگ رشد معین بین آن ها مقدار عدم قطعیت نتایج عددی تعیین می گردد. بدین منظور:

$$p = 1/\ln(r_{21}) |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}|| + q(p) \quad (14)$$

$$q(p) = \ln(r_{21}^p - s/r_{32}^p - s) \quad (15)$$

در معادله (۱۴) r_{32} و r_{21} آهنگ رشد شبکه بندی بوده که مقدار $1/4166$ برای هر دو فاکتور در نظر گرفته شده اند. $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$ و $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ متغیرهای کلیدی در هر مسئله هستند. که در این مطالعه K_Q و K_T در نظر گرفته شده است. حال اگر آهنگ رشد بین سه شبکه یکسان باشد:

تخمین و خطای نسبی برونمایی با استفاده از معادلات (۱۶) الی (۱۸) به ترتیب صورت می گیرد:

$$e_a^{21} = |(\varphi_1 - \varphi_2)/\varphi_1| \quad (16)$$

$$e_{ext}^{21} = |(\varphi_{ext}^{12} - \varphi_1)/(\varphi_{ext}^{12})| \quad (17)$$

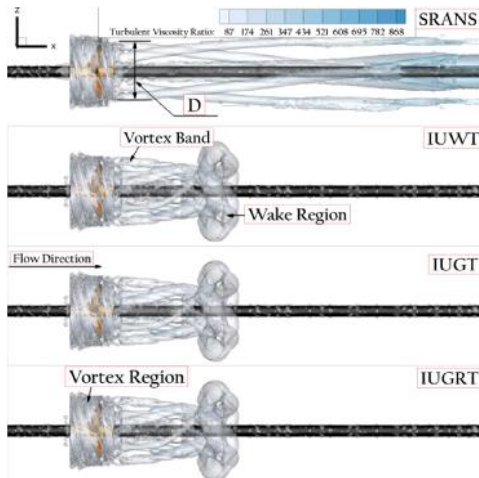
$$GCI_{fine}^{21} = (1.25e_a^{21})/(r_{21}^p - 1) \quad (18)$$

نتیجه مطالعه تائید در جدول ۶ ذکر شده است که مقدار عدم قطعیت GCI برای ضرایب هیدرودینامیکی پیش رانش و گشتاور ناچیز بود.

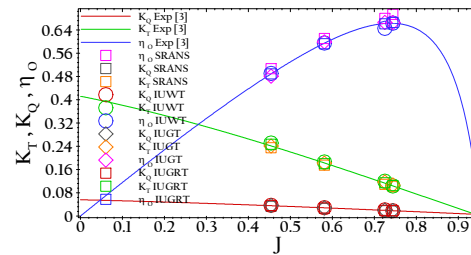
| جدول ۶- محاسبات خطای گسسته سازی برای K_Q و K_T | | |
|--|--------|------------------|
| K_Q | K_T | |
| ۱/۴۱۶۶ | ۱/۴۱۶۶ | r_{21}, r_{32} |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۱۰۹ | φ_1 |

1 Steady RANS
2 Implicit Unsteady Without Transition Model
3 Implicit Unsteady Gamma Transition
4 Implicit Unsteady Gamma ReTheta Transition
5 STAR-CCM+

توسعه‌یافته و مقدار نسبت لزجت آشفتگی بالایی در انتهای دامنه محاسباتی را ارائه می‌دهد. طبق شکل جریان مارپیچی پایا و ناپایا حول ناحیه چرخان به‌خوبی مدل‌سازی شده است ولی در دنباله پایا در پایین‌دست‌تر ارائه‌شده که ناشی از خطای این مدل است. باندهای گردابه که از نوک تیغه به بقیه دامنه توسعه می‌یابند در مدل SRANS دارای قطر کمتری نسبت به سه مدل دیگر هستند که بر روی شکل با D نشان داده شده است.



شکل ۹- دنباله پایا و ناپایا در ضریب 0.4 با معیار $Q=5(1/S^2)$ رنگ‌شده با نسبت ویسکوزیته آشفته



شکل ۸- نتایج محاسبه‌شده و تست آب آزاد

طبق شکل ۱۱ که ضریب فشار حول سه مقطع از ریشه تا نوک نشان داده شده است، هر چه از ریشه به سمت نوک تیغه پیش رویم مقدار فشار منفی بیشتر و حداکثر تلفات جریان را در ناحیه نوک تیغه داریم. با توجه به شکل در ارتفاع 0.7 نقطه شروع جدایش برای تقریباً نزدیک به نقطه حداقل فشار است که با TP روی نمودار نشان داده شده است.

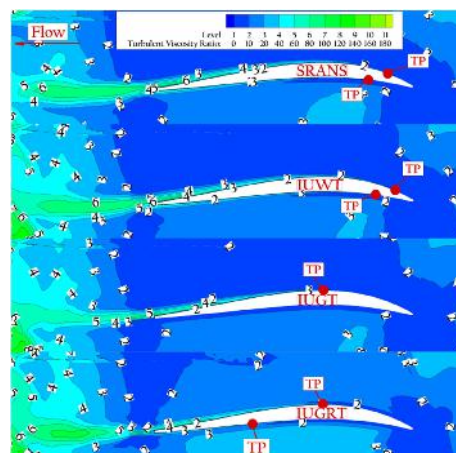
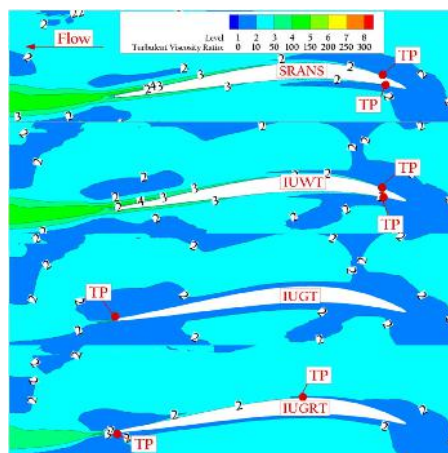
جدول ۷- موقعیت نقطه‌گذار به عنوان درصدی از وتر در ارتفاع 0.7

| مدل | J | سطح فشار | سطح مکش |
|-------|-----|----------|---------|
| SRANS | 0.4 | 0.16 | 0.83 |
| | 0.7 | 0.66 | 0.81 |
| IUWT | 0.4 | 0.63 | 0.85 |
| | 0.7 | 0.71 | 0.89 |
| IUGT | 0.4 | - | 0.35 |
| | 0.7 | - | 0.92 |
| IUGRT | 0.4 | 0.45 | 0.26 |
| | 0.7 | 0.37 | 0.88 |

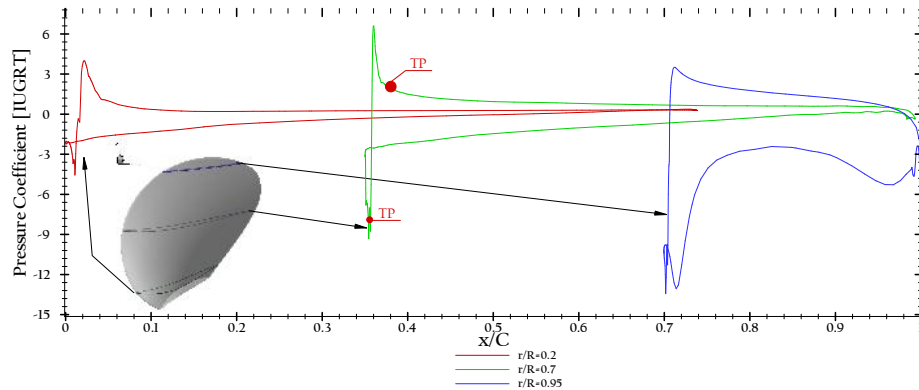
در شکل ۹ دنباله پروانه با مقدار معیار Q یکسان در هر مدل عددی نشان داده شده است. در مدل SRANS دنباله تا ناحیه خروجی

جدول ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی (Num - Exp/Exp * 100 = %Error)

| J | 0.7 | تست آب آزاد [۳] | SRANS | IUWT | IUGT | IUGRT |
|---------|---------|-----------------|-------|--------|--------|--------|
| پارامتر | K_T | 0.113 | 0.109 | 0.1199 | 0.1171 | 0.1146 |
| | K_Q | 0.202 | 0.185 | 0.214 | 0.203 | 0.2 |
| خطا % | % K_T | . | -3/53 | 6/10 | 3/64 | 1/41 |
| | % K_Q | . | -7/5 | 7/15 | 1/5 | 0.0005 |



شکل ۱۰- پیش‌بینی نقطه‌گذار جریان در لایه‌مرزی راست (J=0.4) چپ (J=0.7)



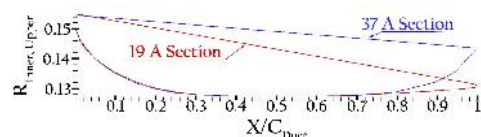
شکل ۱۱- ضریب فشار حول سطوح مکشی و فشاری پروانه در $J=0.4$ مدل IUGRT

۵- پروانه دارای مجرا

مجرا یک مقطع فویل بالابر است که حول محور طولی چرخانده می‌شود و زمانی که جریان از آن عبور می‌کند نیروهایی را تولید می‌کند. این نیروها حاصل تغییرات فشار بر روی سطح فویل هستند و به دینامیک برآ و پسا تقسیم‌بندی شوند که نیروی برآ L عمود و نیروی پسا D موازی با جهت جریان در ورودی است. اگر مؤلفه‌های جریان را به سمت داخل مجرا در نظر بگیریم و نیروها را تجزیه کنیم، در مجرا مؤلفه نیرویی که مورد توجه است و معمولاً جایگزین برآ و پسا می‌شود مؤلفه تراست در جهت افقی است. دسته‌بندی مجراها براساس اثر مجرا روی سرعت جریان است که به دودسته کاهنده و افزایشده سرعت تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. در این مقاله پس از بررسی منابع مختلف دو مجرا استاندارد برای تحقیق حاضر انتخاب گردید. در این راستا از دو مجرا افزایشده سرعت استاندارد با کد ۱۹ و ۳۷ آ برای پروانه طراحی شده در قسمت ۲ استفاده شده است. در شکل ۱۲ مقطع دو مجرا مورد نظر نشان داده شده است. ضریب هیدرودینامیکی بی‌بعد پیش‌رانش مربوط به مجرا به وسیله معادله (۱۹) محاسبه می‌شود و بازدهی پروانه دارای مجرا برابر با معادله (۲۰) است.

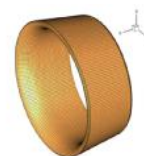
$$K_{TD} = T_{Duct} / \rho n^2 D_p^4 \quad (19)$$

$$\eta_0 = J / 2\pi \cdot (K_{TP} + K_{TD} / K_{QP}) \quad (20)$$



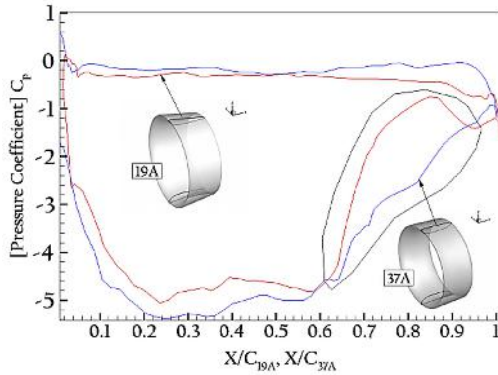
شکل ۱۲- مقطع مجرا استاندارد ۱۹ و ۳۷ آ [۱]

شبهه‌سازی‌های صورت گرفته در حالت پایا و برای ضریب پیشروی ۰/۵ بوده است. در شکل ۱۳ شبکه‌بندی روی سطح مجرا ۱۹ آ نشان داده شده است. شبهه‌سازی‌های صورت گرفته در حالت پایا و برای ضریب پیشروی ۰/۵ بوده است.



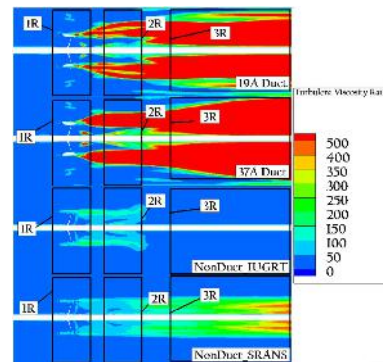
شکل ۱۳- شبکه‌بندی سطحی روی مجرا استاندارد ۱۹ آ

پس از بررسی نتایج طبق جدول ۹ مقادیر بازدهی و ضرایب پیش‌رانش پروانه درون مجرا به‌طور کلی کاهش می‌یابند از جمله دلایل این کاهش اثرات گردابه‌های لقی بین مجرا و نوک تیغه است که باعث برهم زدن جریان در سطح پشت پروانه و همچنین تغییر دادن الگوی جریان از ناحیه قبل از پروانه است که ناشی از حضور مجرا در میدان جریان است. یک پارامتر مناسب برای نشان دادن شدت تلفات، گردابه است که به‌عنوان کرل میدان سرعت $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$ تعریف می‌شود و به‌وسیله آن چرخش موضعی سیال سنجیده می‌شود. جایگاه گردابه صفر است جریان غیرچرخشی است. با توجه به شکل ۱۶ جریان چرخشی در نوک تیغه در دو مدل مجرا نشان داده شده است که مقدار چرخش جریان حول دیواره مجرا ۳۷، نوک و دیواره تیغه بیشتر بود که بیشترین کاهش را روی بازده پروانه گذاشت. در حالت بدون مجرا نیز یک هسته چرخشی در پایین‌دست در راستای نوک تیغه مشاهده گردید که در پروانه همراه مجرا این ناحیه ضعیف‌تر بود. در شکل ۱۵ ضریب فشار حول دیواره دو مجرا ارائه شده است. برای مجرا ۳۷ آ در ناحیه مشخص شده در نمودار، افت سریع‌تر فشار را در ناحیه فرار تیغه داشته است ولی در مجرا ۱۹ آ این ناحیه دیرتر به افت فشار رسیده که از دلایل آن می‌توان به زاویه حمله کمتر و ضخامت بیشتر مجرا ۳۷ اشاره نمود. بنابراین در این ناحیه جدایش جریان قوی‌تری به وجود آمده است. در شکل ۱۴ خطوط هم‌تراز برای پروانه‌ها در درون مجرا و بدون مجرا نشان داده شده است که به سه ناحیه تقسیم‌بندی صورت گرفته است در ناحیه ۱ برای مجرا ۱۹ آ در لبه فرار در سمت مکشی مجرا آشفتگی بیشتر نسبت به مجرا ۳۷ آ پیش‌بینی شده است که ناشی از زاویه حمله بیشتر این مجرا است. در بالادست مجرا نزدیک به قطر حداکثر ناحیه استاتیک یک ناحیه آشفته ضعیف‌تر برای هر دو مجرا ایجاد شده که ناشی از حضور مجرا در میدان جریان بوده و در پروانه بدون مجرا این ناحیه وجود نداشت. در ناحیه ۱ در نزدیکی ریشه تیغه دو هسته آشفتگی شدید پیش‌بینی شده که به ترتیب در مجرا ۳۷، ۱۹ و بدون مجرا دارای شدت است. در ناحیه ۲ هسته آشفته شدیدی که در ناحیه ۱ بود به درون ناحیه ۲ توسعه یافته که در مجرا ۳۷ شدیدتر است. دنباله آشفته لبه فرار مجرا نیز در ناحیه ۲ برای مجرا ۱۹ آشفتگی کمتری نسبت به ۳۷ آ ارائه نمود. در ناحیه ۳ گسترش یافتگی آشفتگی برای ۳۷ آ دارای بیشترین قطر و تا مقدار قطر خروجی توسعه یافت. در پروانه بدون مجرا شدت آشفتگی محدود به قطر ناحیه چرخان



شکل ۱۵- ضریب فشار حول مقطع مجرا در ضریب ۰/۵

بوده و در پایین‌دست‌ترین نقطه جریان شدت می‌یابد.



شکل ۱۴- خطوط هم‌تراز نسبت لزجت آشفتگی جریان در ضریب پیشروی ۰/۵ برای پروانه دارای مجرا و بدون مجرا

جدول ۹- ضرایب هیدرودینامیکی پروانه مجرادار و بدون مجرا در ضریب پیشروی ۰/۵ ($(Num - NumBase)/NumBase \times 100 = \%differ$)

| ⁸ hoT | ⁷ hoPWD | ⁶ hoP | ⁵ KTD | ⁴ KQPWD | ³ KQP | ² KTPWD | ¹ KTP | هندسه / پارامتر |
|------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| ۰/۶۱ | - | ۰/۶۱ | - | - | ۰/۰۲۶۵ | - | ۰/۱۷۵ | پروانه بدون مجرا |
| ۰/۶۸۸ | ۰/۵۳ | - | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۲۵ | - | ۰/۱۴۴ | - | مجرا ۱۹ |
| ۰/۶۵۵ | ۰/۴۸۵ | - | ۰/۰۳۷۸ | ۰/۰۲۰۴ | - | ۰/۱۰۷۶ | - | مجرا ۳۷ |
| +۱۲/۶۶ | -۱۳/۲ | - | - | -۵/۶۶ | - | -۱۷/۷۱ | - | افزایش / کاهش |
| +۷/۲۶ | -۲۰/۵۷ | - | - | -۲۳/۰۱ | - | -۳۸/۵ | - | % |

¹KTP (K_{TProp}), ²KTPWD (K_{TPropwithDuct}), ³KQP (K_{QProp}), ⁴KQPWD (K_{QPropwithDuct}), ⁵KTD (K_{TDuct}), ⁶hoP (η_{oProp}), ⁷hoPWD (η_{oPropwithDuct}), ⁸hoT (η_{oTotal})



شکل ۱۶- خطوط جریان با ۱۸۰۰ بر دار، رنگ‌شده به‌وسیله گردابه 1/s در ضریب پیشروی ۰/۵ و موقعیت Y=0

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر یک پروانه استاندارد با گام ثابت طراحی شد و سپس با استفاده از یک برنامه کامپیوتری هندسه پروانه تولید گردید. برنامه کامپیوتری موردنظر برای پروانه‌های گام ثابت که داده‌های ورودی آن‌ها طبق روند نمای ارائه‌شده باشد قابل‌استفاده است. سپس با استفاده شبکه‌بندی هیبریدی فضای حل گسسته‌سازی و میدان جریان با یک روش پایا و سه روش ناپایا شبیه‌سازی و بررسی شد. عدم قطعیت هندسه و شبکه‌بندی به‌وسیله برونپایی ریچاردسون تخمین زده‌شده مقدار شاخص همگرایی شبکه بسیار مناسب بود که نشان‌دهنده دقت در تولید هندسه به‌وسیله برنامه استفاده‌شده و شبکه‌بندی هیبریدی بود. پس از اعتبار سنجی نتایج منحنی‌های عملکرد پروانه در حالت ناپایا به نتایج آب آزاد نزدیک‌تر بود. در قسمت جریان گذار نقطه جدایش جریان لایه‌ای به آشفتگی در دو ضریب ۰/۴ و ۰/۷ بررسی گردید که با افزایش ضریب پیشروی نقطه جدایش جریان از لبه حمله به سمت لبه فرار در هر سطح سوق یافت که ناشی از افزایش مؤلفه فشاری و کاهش مؤلفه لزج درون لایه‌مرزی بود. در روش های پایا تخمین جدایش

جریان به سمت لبه حمله تیغه نزدیک‌تر و در روش های ناپایا این نقطه با تأخیر بیشتری در فاصله بیشتری از وتر تخمین زده شد. با بررسی منحنی ضریب فشار در ارتفاع ۰/۷ و تعیین نقطه جدایش جریان روی نمودار این نقطه نزدیک به حداقل فشار حول سطح فشاری و مکشی بود. ناحیه ویک پشت پروانه در روش پایا طولانی‌تر و تا نزدیکی انتهای ناحیه خروجی کشیده شده بود. الگوی جریان ماریچی در سه مدل شبیه‌سازی به یکدیگر نزدیک بود. دنباله پشت پروانه به غیر از حالت پایا نزدیک به یکدیگر پیش‌بینی گردید. در مدل IUWT شدت آشفتگی پشت پروانه بیشتر از سایر روش‌ها پیش‌بینی شد. نتایج منحنی‌های عملکرد در سه مدل ناپایا نزدیک‌تر و در مدل پایا خطای بیشتری از نتایج مینا داشت ولی در کل دقت پیش‌بینی ضرایب هیدرودینامیک تمام مدل‌ها در محدوده مناسبی بود. در قسمت آخر مقاله نیز دو مجرا بر روی پروانه طراحی‌شده قرار داده و الگوی جریان بررسی گردید که می‌توان به این موارد اشاره نمود: قرار دادن مجرا بر روی پروانه در مجموع بازدهی پروانه را در اثر نشتی بین مجرا و نوک تیغه کاهش می‌دهد ولی مجرا با سهم پیش‌رانش تولیدی خود می‌تواند

[16] Arief I. S., Musriyadi T. B. and Mafera A. D. A. J., Analysis Effect of Duct Length–Nozzle Diameter Ratio and Tip Clearance Variation on the Performance of K-Series Propeller. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol. 2, 2017.

[17] Bhattacharyya A., Neitzel J. C., Steen S., Abdel-Maksoud M. and Krasilnikov V., Influence of flow transition on open and ducted propeller characteristics. in *Fourth International Symposium on Marine Propulsors, Austin, Texas, USA*, 2015.

[18] Wang X. and Walters K., Computational analysis of marine-propeller performance using transition-sensitive turbulence modeling. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 134, p. 071107, 2012.

[19] Molland A. F., Turnock S. R. and Hudson D. A., *Ship resistance and propulsion*. Cambridge university press, 2017.

[20] Bertram V., *Practical ship hydrodynamics*. Elsevier, 2012.

[21] Breslin J. P. and Andersen P., *Hydrodynamics of Ship Propellers*. Cambridge Ocean Technology Series, 3. ed, 1995.

[22] Versteeg H. K. and Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics. the finite volume method*, Pearson Education, 2007.

[23] Menter F. and Egorov Y., Development and application of SST-SAS turbulence model in the DESIDER project. *Advances in Hybrid RANS-LES Modelling*, pp. 261-270, 2008.

[24] Malan P., Suluksna K., and Juntasaro E., Calibrating the gamma-Re_theta transition model for commercial CFD. in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009, p. 1142.

[25] *STAR-CCM+ Documentation*, 2017.

[26] Schlichting H. and Gersten K., *Boundary Layer Theory*. Springer, 2016.

[27] Lamb H., *Hydrodynamics*, 6 ed. New York: Dover, 1945.

[28] Luget H. J., The dilemma of defining a vortex. *Springer*, pp. 309-321, 1979.

[29] Hunt J. C. R., Wray A. A., and Moin P., Eddies, stream and convergence zones in turbulent flows. CTR1988.

[30] Chong M. S., Perry A. E., and Cantwell B. J., A general classification of three- dimensional flow field. *phys.Fluids*, p. 765/777, 1990.

[31] Moore G., Cyclic and Symmetric Boundary Conditions Ways to Reduce the Size of Numerical Models. *Tarpoff Moore Engineering, Inc*, pp. 513-932-9777, 2015.

[۳۲] ملکی ع، هادی پورگودری ر، ا، علیزاده ا، کریمی س، احمدی ع، مطالعه عددی عملکرد پروانه در آب آزاد با در نظر گرفتن شروط مرزی پریودیک، سومین کنفرانس ملی - مهندسی مکانیک، مشهد-اسفراین، ۲۰۱۷.

[33] Jessup S., Experimental data for RANS calculations and comparisons (DTMB P4119). in *22nd ITTC Propulsion Committee Propeller RANS/Panel Method Workshop, Grenoble, Apr. 1998*, 1998.

[34] Jessup S. D., Measurement of multiple blade rate unsteady propeller forces. DAVID TAYLOR RESEARCH CENTER BETHESDA MD1990.

[35] Kulczyk J., SKRABURSKI Ł. and ZAWIŚLAK M., Analysis of screw propeller 4119 using the Fluent system. *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 7, pp. 129-137, 2007.

[36] Richardson L. F., The approximate arithmetical solution by difference of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. *Trans. R. Soc.* Vol. 210, pp. 459-490, 1911.

[37] Richardson L. F. and Gant J. A., The deferred approach to the limit, *Trans. R. Soc.* Vol. 226, pp. 636-646, 1927.

کاهش تراست و بازدهی را جبران و افزایش دهد، الگوی جریان در نوک تیغه مجرا ۳۷ دارای تلفات بیشتری بوده که بر روی دیواره تیغه و حتی پایین دست پروانه نیز تأثیرات قابل توجهی داشت. مقایسه خطوط جریان حول پروانه باز و دارای مجرا نشان دهنده یک هسته گردابه قوی برای پروانه باز بود که در راستای جریان نوک تیغه و کمی پایین دست تر از جریان شناسایی شد، جریان حول مقطع مجرا ۳۷ دارای گردابه بیشتری نسبت به مجرا ۱۹ بود که از منابع افت بیشتر این مقطع بود. ضریب فشار حول مقاطع مجرا ۳۷ و ۱۹ یک ناحیه افت سریع فشار را برای مجرا ۳۷ ارائه نمود. پس از بررسی خطوط همتراز به وسیله نسبت لرجت آشفنگی جریان پشت مجرا دارای آشفنگی بیشتری نسبت به پروانه باز بود که مجرا ۱۹ دارای هسته های آشفنگی کوچک تری نسبت به مجرا ۳۷ بود.

۷- مراجع

[1] Carlton J., *Marine propellers and propulsion*. Butterworth-Heinemann, 2012.

[2] Shamsi R. and Ghassemi H., Numerical Analysis of Marine Propulsor Using Coupled BEMT/RANS Method. *Journal Of Marine Engineering*, Vol. 13, pp. 1-14, 2017.

[3] Bernitsas M. M., Ray D. and Kinley P., KT, KQ and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers. 1981.

[4] Observed M. and Pvan O., Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series. *Int Shipbuild Progr*, pp. 251-62, 1975.

[5] Van Lammeren W., Van Manen J. and Oosterveld M., The Wageningen B-screw series. 1969.

[6] Eckhardt M. and Morgan W., *A propeller design method*. Vol. 63: SNAME, 1955.

[7] Ekinci S., A practical approach for design of marine propellers with systematic propeller series. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, Vol. 62, pp. 123-129, 2011.

[8] Gaafary M., El-Kilani H. and Moustafa M., Optimum design of B-series marine propellers. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 50, pp. 13-18, 2011.

[9] Nguyen T. and Ikeda Y., A Numerical Study on Open-Water Propeller Characteristics. in Conference of JASNAOE Annual Spring Meeting, At Kobe, Japan, 2015.

[10] Elghorab M. A., Al E., Elwetedy S. and Kotb A., Open Water Performance of a Marine Propeller Model Using CFD. in Proceedings of International Conference on Fluid Dynamics, ICFD11, At Alexandria, Egypt, Vol. 11, 2013.

[11] Hayati A. N., Hashemi S. M., and Shams M., A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack. *Ocean Engineering*, Vol. 59, pp. 152-163, 2013.

[12] Paik K.-J., Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 9, pp. 655-667, 2017.

[۱۳] ولی ع، سرانجام ب، کمالی ر، ربیعی و، تحلیل عددی عملکرد پروانه در نزدیک سطح آب، مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۱۶، ص ۲۹۱-۲۹۹، ۱۳۹۵.

[14] Boucetta D. and Imine O., Numerical Simulation of the Flow around Marine Propeller Series. *Journal of Physical Science and Application*, vol. 6, pp. 55-61, 2016.

[15] Chamanara M. and Ghassemi H., Hydrodynamic Characteristics of the Kort-Nozzle Propeller by Different Turbulence Models. *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 4, pp. 169-172, 2016.