



توسعه روش ترکیبی المان مرزی و حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس به منظور تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار

رضا شمسی¹، حسن قاسمی^{2*}

1- دانش آموخته دکتری، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* صندوق پستی 15875-4413، gasemi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آبان 1395

پذیرش: 21 دی 1395

ارائه در سایت: 10 بهمن 1395

کلید واژگان:

روش ترکیبی

روش المان مرزی

روش معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس

سیستم رانش پاددار

چکیده

سیستم های رانش پاددار یکی از آخرین نوآوری ها در زمینه سیستم های رانش دریایی است. تحلیل هیدرودینامیکی این سیستم پیچیده تر از سیستم های رانش معمولی پروانه و سکان است. روش های عددی مختلفی در تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار استفاده شده، محدوده این روش ها شامل روش های پتانسیل کامل تا روش های کاملاً ویسکوز و یا رویکرد استفاده از روش های ترکیبی است. هدف اصلی این تحقیق توسعه یک روش عددی ترکیبی بر مبنای روش های پتانسیل و ویسکوز برای تحلیل هیدرودینامیکی سیستم های رانش پاددار است. جریان در این روش ترکیبی پیشنهادی پتانسیل و ویسکوز حول اجزای چرخشی (پروانه) به وسیله یک کد پتانسیل توسعه داده شده به روش المان مرزی شبیه سازی شده است؛ سپس از یک حل گر ویسکوز بر مبنای حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس برای تحلیل جریان حول اجزای غیرچرخشی (پاد و استرات) استفاده می شود. در این بخش اثر پروانه به وسیله یک توزیع پراکنده نیرو معادل بیان می شود که به صورت نیروهای حجمی به سمت راست معادله مومنوم اضافه می شود. در این حالت دو سیکل انتقال برای کوپل نتایج بین دو حل گر پتانسیل و ویسکوز وجود دارد. در مرحله نخست دقت این روش ترکیبی با تحلیل هیدرودینامیکی یک پروانه به تنهایی مورد بررسی و معتبر سازی شد. در ادامه کل سیستم رانش پاددار در جریان مستقیم با استفاده از روش پیشنهادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و نتایج شامل ضرایب تراست و گشتاور پروانه و نیروی کل سیستم رانش است. در ادامه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده و دقت این روش ترکیبی ارزیابی شده است.

A BEM/RANS Coupled Method for Numerical Simulations of Podded Drive System

Reza Shamsi¹, Hassan Ghassemi^{2*}

1- Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, gasemi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 October 2016
Accepted 10 January 2017
Available Online 29 January 2017

Keywords:
Coupled Method
BEM Method
RANS Method
Podded Drive System

ABSTRACT

Podded drive systems are one of the recent innovations in marine propulsion systems. Hydrodynamic analysis of this system is more complicated than conventional propeller-rudder systems. The different numerical methods have been used in the hydrodynamic analysis of podded drive systems. The range of these methods is from the potential method or potential/viscous approach to pure viscous methods. In this paper, we applied coupled approach in this regard. The main purpose of this research is developing a BEM/RANS coupled method for numerical simulation of podded drives. In the proposed Potential/Viscous coupled method, the flow around rotating part (propeller) is simulated by a BEM code. Then fixed parts (pod and strut) are modeled by a RANS solver. In RANS solver, the propeller can be substituted by a set of equivalent forces which is called body force and added in the right hand of momentum equation. Two cycles are available for coupling the result between potential and viscous method. The coupled method is first studied and validated with a single propeller. Afterward, the propulsive performance of the podded drive systems is studied. The results include the propeller thrust coefficient, the propeller torque coefficient, and the axial force coefficient. The results obtained by coupled method are compared to and verified by the experimental data.

1- مقدمه

ارتعاشات و نویز کمتر و قابلیت عملکرد مطمئن تر است. سیستم های رانش پاددار¹، پروانه های نازل دار و سیستم های واتر جت نمونه های از طرح های موفق در این زمینه است. سیستم رانش پاددار از تازه ترین ابداعات در زمینه

در دهه های اخیر تقاضا برای شناورهای با سرعت بالا در بخش های نظامی و تجاری دارای روند رو به رشدی بوده است. این موضوع سبب طراحی پیش برنده های دریایی با هندسه های پیچیده شده که دارای راندمان بالاتر،

¹ Podded Drive System

Please cite this article using:

R. Shamsi, H. Ghassemi, A BEM/RANS Coupled Method for Numerical Simulations of Podded Drive System, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 65-76, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این موضوع سبب به کارگیری و توسعه تکنیک های عددی در تحلیل هیدرودینامیکی سیستم های رانش پاددار شده است. از روش های عددی مختلفی برای تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار استفاده می شود. محدوده این روش ها شامل روش های پتانسیل کامل تا روش های کاملاً ویسکوز است. به طور کلی روش های به کار گرفته شده بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی به دو دسته جریان غیرویسکوز و جریان ویسکوز تقسیم بندی می شوند. روش های غیرویسکوز بر مبنای تئوری پتانسیل شکل گرفته، در حالی که مبنای ایجاد روش های ویسکوز استفاده از حل عددی معادلات ناویر- استوکس و معادله پیوستگی است [3].

روش های پتانسیل مختلفی روش خطوط برآ²، سطوح برآ³ و المان مرزی⁴ برای تحلیل پروانه های دریایی ارائه شده است. روش المان مرزی یک ابزار مناسب و قوی برای تحلیل هیدرودینامیکی پروانه شناورهاست و تاکنون محققان زیادی با استفاده از این روش نتایج قابل پذیرشی به دست آورده اند [4]. در این روش بر خلاف دیگر روش های محاسباتی (اجزا محدود و یا حجم محدود)، تولید المان فقط در مرز جسم انجام و منجر به کاهش زمان و هزینه محاسباتی می شود. هر چند روش های پتانسیل اثرات ویسکوزیته را در نظر نمی گیرد و جریان غیرچرخشی مفروض است. کاربردهای این روش علاوه بر هیدرودینامیک و مکانیک سیالات در دیگر زمینه های مهندسی از جمله مکانیک سازه ها، دینامیک و ارتعاشات است [5,6].

از نخستین کارهای عددی انجام شده در زمینه تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار توسط قاسمی و همکارش [7] به روش المان مرزی در سال 1999 بود. عملکرد این سیستم در جریان مستقیم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این راستا جهت بررسی اثر زاویه یاو آچکیندز و همکاران [8] یک روش پائل شبه یکنواخت بر مبنای سرعت ایجاد و از ضرایب اصلاحی تجربی مربوط به لیفت و درگ برای مقاطع پره و استرات و سرعت های القایی پروانه برای بهبود این روش استفاده کرد. روش پتانسیل لیو و همکاران از مهم ترین و تازه ترین تحقیقات در زمینه تحلیل سیستم های پاددار است [9,10]. ضعف روش های پتانسیل عدم پیش بینی صحیح نیروهای مقاومت پاد و نیروهای وارده به مجموعه در زوایای یاو بالاست. این موضوع قابلیت های روش پتانسیل را در برابر مسائلی چون پیش بینی مقاومت پاد و یا اندرکنش بین پروانه و مجموعه پاد محدود می کند. برای بهبود نتایج روش المان مرزی می توان از روش ضرایب اصلاحی تجربی مربوط به لیفت و درگ مقاطع پره و استرات و سرعت های القایی پروانه استفاده کرد. هرچند این روش اصلاحی کاربرد محدودی دارد. روش المان مرزی در سرعت ها و زوایا بالا در حل این مساله مشخص کاربرد چندانی ندارد.

در سیستم های پاددار اندرکنش بین پروانه و مجموعه پاد و استرات بسیار مهم است. ویسکوزیته و غیریکنواختی جریان نقش اصلی را در این تقابل ایفا می کند. هنگامی که سیستم های پاددار در معرض جریان غیرمستقیم قرار می گیرند و اثرات جدایی جریان اعمال می شوند، این امر تشدید می شود. در دینامیک سیالات محاسباتی ویسکوز، روش معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس یا RANS⁵ یک روش مناسب و متعادل برای محاسبه این نوع اندرکنش هاست. نخستین کاربردهای این روش برای تحلیل سیستم های پاددار به اواخر دهه نود میلادی بازمی گردد. سانچز و همکاران [11] جریان را در اطراف یک پاد فشاری با استفاده از یک حل گر که

سیستم های رانش کشتی هاست که کاربردهای مختلف تجاری و نظامی دارد. سیستم پیش برنده پاددار شامل یک پروانه گام ثابت است که توان آن به وسیله یک موتور الکتریکی تأمین و با یک شفت کوتاه منتقل می شود. شفت و موتور الکتریکی در داخل پوسته پاد قرار گرفته اند. مجموعه پاد از طریق استرات¹ و سیستم یاتاقان به بدنه کشتی متصل می شود. این سیستم به مجموعه پاد قابلیت چرخش 360 درجه ای می دهد و از این طریق پروانه می تواند نیروی تراست را در جهت های مختلف ایجاد کند (شکل 1). توانایی ایجاد تراست در جهات مختلف و افزایش چشمگیر قابلیت مانورپذیری شناور مهم ترین مزیت این سیستم در قیاس با سیستم های پروانه ای معمولی است. سیستم های رانش پاددار با توجه به موقعیت قرارگیری پروانه به دو دسته کلی سیستم پاد کششی و سیستم پاد فشاری تقسیم می شوند. در سیستم پاد کششی پروانه در جلوی پاد و پیش از استرات، اما در سیستم پاد فشاری پروانه در انتهای پاد و پس از استرات قرار گرفته است. در سرعت های بالا راندمان سیستم فشاری به دلیل قرار گرفتن پروانه در ویک شدید استرات کاهش می یابد. در مقابل سیستم پاد کششی دارای مزایایی از جمله راندمان بالا و کنترل پذیری بهتر است [1].

با توجه به استقبال از سیستم های رانش پاددار و روند رو به رشد نصب این سیستم بر شناورهای تجاری و نظامی و مزایا استفاده از آن براساس مقالات علمی و صنعتی منتشر شده، مشکلات عملیاتی در استفاده از این سیستم وجود دارد که در سیستم های رانش معمولی مشاهده نشده است. در بررسی های انجام شده مشخص گردید که خرابی سیستم یاتاقان بندی از مهم ترین دلایل عیوب مکانیکی این سیستم هاست. نداشتن پیش بینی درست نیروهای وارده بر سیستم رانش پاددار در شرایط مختلف کاری از دلایل اصلی وقوع خرابی در سیستم یاتاقان بندی است. طراحی بهینه سیستم یاتاقان بندی نیازمند مطالعه و بررسی دقیق نیروها و ممان های وارد بر آن ناشی از پروانه و پاد در شرایط کاری با زوایای یاو مختلف است. در سیستم های پاددار اندرکنش بین پروانه و مجموعه پاد و استرات بسیار مهم است. ویسکوزیته و غیریکنواختی جریان نقش اصلی این تقابل را ایفا می کند. این پیچیدگی هنگام فعالیت سیستم پاددار در زوایا مختلف یاو افزایش می یابد. در این حالت نیروها و ممان های پروانه برحسب تابعی غیرخطی از زاویه یاو و سرعت پیشروی تغییر می کند [2].

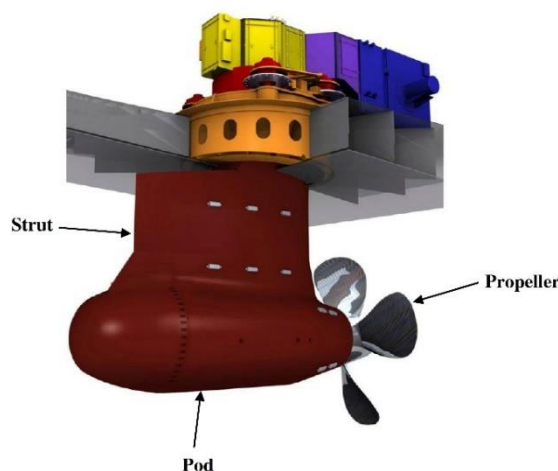


Fig. 1 Podded drive system (included propeller, pod, and strut)

شکل 1 سیستم رانش پاددار (شامل پروانه، پاد و استرات)

¹ Strut

² Lifting Line

³ Lifting Surface

⁴ Boundary Element Method

⁵ Reynolds-Averaged Navier-Stokes

2- هیدرودینامیک پروانه و سیستم رانش پاددار

برای حرکت شناور در یک سرعت معین نیازمند به اعمال نیروی غالب بر مقاومت آب است. این نیرو به وسیله پروانه تولید می شود. پروانه از تعدادی پره تشکیل شده که حول تویی پروانه قرار گرفته، مجموعه پروانه با حرکت دورانی شفت شناور در حال چرخش است. اگر هر مقطع پروانه به صورت یک فویل فرض شود، اختلاف فشار ایجاد شده میان دو سطح رخ و پشت پره سبب ایجاد نیروی تراست و حرکت کشتی می شود. چنانچه پروانه با سیالی با سرعت محوری (V) و با سرعت زاویه ای ثابت $\omega = 2\pi n$ برخورد کند نیروی تراست (T) و یا توان (TV) را ایجاد می کند، در حالی که توان $2\pi nQ$ را مصرف میکند؛ بنابراین راندمان به صورت رابطه (1) خواهد بود [1].

$$\eta = \frac{TV}{2\pi nQ} \quad (1)$$

مشخصات عملکردی پروانه را می توان به صورت ضرایب بدون بعد تعریف کرد که به ترتیب عبارت از ضریب پیشروی، ضریب تراست، ضریب گشتاور و راندمان پروانه، روابط (2-5) است.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (2)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (3)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (5)$$

در یک سیستم رانش پاددار، ضرایب نیروهای محوری و جانبی به صورت روابط (6,7) تعریف می شود.

$$K_{Fx} = \frac{F_x}{\rho n^2 D^4} \quad (6)$$

$$K_{Fy} = \frac{F_y}{\rho n^2 D^4} \quad (7)$$

که F_x و F_y به ترتیب نیروهای کل وارد بر سیستم رانش در جهت های محوری و جانبی است.

3- روش المان مرزی

در سال های اخیر روش المان مرزی به عنوان یکی از ابزارهای محاسباتی در هیدرودینامیک شناورها کاربرد بسیاری داشته است. روش مورینو که یک روش پانل بر مبنای پتانسیل است در سال 1974 ارائه شد. این روش بر مبنای فرمولاسیون گرین، که در آن مجهولات پتانسیل است، در حالی که در دیگر روش های پیش از این بر مبنای فرمولاسیون سرعت بودند که شرایط مرزی بر سطح جسم از محاسبه مستقیم سرعت برآورده می شدند [16]. روش پانل بر مبنای پتانسیل مورینو نسبت به روش های پانل بر مبنای سرعت پایدارتر و مناسب تر برای محاسبات عددی است، زیرا درجه سینگولاریتی پتانسیل یک درجه کمتر از سرعت است. روش مورینو تاکنون به وسیله افراد دیگری برای پروانه های دریایی به صورت موفقیت آمیز استفاده شده است [17,18].

3-1- معادلات حاکم

مساله جریان در اطراف یک پروانه را می توان به صورت زیر بیان کرد. ناحیه بسته V را مطابق شکل 2 با مرز S و بردار واحد $\vec{n}$ عمود بر S در نظر گرفت. مرز S ناحیه جریان شامل سطح جسم S_B ، سطح دنباله S_W و سطح کنترل بیرونی S_∞ که سطح جسم و دنباله را احاطه کرده است. با این فرض که

مبنای حل آن روش رانز¹ است به صورت غیریکنواخت تحلیل کرد. کارهای عددی انجام شده به وسیله آمینی و همکارش [12] و شمسی و همکاران [13,14] از تازه ترین کارهای انجام شده در این زمینه به روش رانز است. روش های ویسکوز یک راه کار مناسب برای تحلیل جریان حول اجسام با اجزای غیرچرخشی و چرخشی در کنار یکدیگر است. هر چند این روش زمان بر و پرهزینه تر از روش های عددی دیگر است. مهم ترین مشکل در این روش مدل سازی اجزای چرخشی سیستم رانش است، به خصوص در مسائل غیرمتقارن، هنگامی که نیاز به مش های لغزان است این موضوع اهمیت ویژه ای دارد. یک راه حل مناسب استفاده از روش های ترکیبی ویسکوز و پتانسیل برای تحلیل هیدرودینامیکی مجموعه پاد و پروانه است.

همان طور که بیان شد هر یک از روش های پتانسیل و ویسکوز دارای مزایا و معایب مشخص با تأثیرگذاری در تحلیل سیستم های پاددار است. روش های پتانسیل یک ابزار سریع و با دقت مناسب برای طراحی و تحلیل این سیستم هاست. هرچند جهت بررسی برخی از مسائل مرتبط با سیستم های رانش پاددار مانند اثر مقیاس در بین نتایج مدل و اندازه واقعی، تأثیر زاویه یاو و پدیده کاویتاسیون نیازمند استفاده از روش های ویسکوز است. روش های ویسکوز با وجود توانایی بالا در تحلیل های هیدرودینامیکی ضعف هایی در زمینه مدل سازی، تولید شبکه حل و زمان محاسباتی دارد که این موارد در تحلیل سیستم های رانش پاددار که با پیچیدگی های هندسی خاصی شدت می یابد.

با توجه به این موارد در چند سال اخیر پژوهشگران و محققان سعی کردند با استفاده از روش های ترکیبی غیرویسکوز/ ویسکوز بتوانند در جهت رفع معایب یادشده و بهبود حل گام بردارند. در تحلیل هیدرودینامیکی سیستم های رانش پاددار به کمک روش های ترکیبی سعی می شود جریان در اطراف پروانه با روش های پتانسیل تحلیل می شود، ولی جریان در اطراف مجموعه پاد و استرات با روش های ویسکوز شبیه سازی می شود. روش ترکیبی المان مرزی با ویسکوز یک از تازه ترین روش های ترکیبی در زمینه تحلیل های هیدرودینامیکی در حوزه دریایی است. این روش نخستین بار برای تحلیل هیدرودینامیکی جریان حول بدنه و پروانه و بررسی اثر اندرکنش بین بدنه و پروانه² استفاده شده است [15].

در این روش جریان حول پاد و استرات با کمک روش ویسکوز مانند روش معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس تحلیل شده و عملکرد پروانه با روش المان مرزی پیش بینی می شود، سرانجام این روش ها به منظور در نظر گرفتن اثرات پروانه، پاد و استرات بر هم با یکدیگر کوپل می گردند. در این اثر پروانه نیز به وسیله نیروهای حجمی³ در روش ویسکوز اعمال می گردد.

هدف اصلی توسعه یک روش ترکیبی المان مرزی/ ویسکوز و استفاده از آن تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار است. در این راستا نخست به معرفی مشخصات هیدرودینامیکی پروانه های دریایی پرداخته می شود، سپس معادلات حاکم در دو روش المان مرزی و روش معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس بررسی می شود. در نهایت اصول روش ترکیبی معرفی شده و روش کوپل نتایج بین این دو روش تشریح می شود. از این روش ترکیبی در تحلیل یک سیستم رانش پاددار در جریان مستقیم استفاده و نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است.

¹ RANS

² Hull-propeller interaction

³ Body Force

2-3- شرایط مرزی

مسأله مقدار مرزی بالا با مشخص کردن سه شرط مرزی روی مرز S به صورت زیر ساخته می شود.

الف) شرط سرعت مماسی روی سطح خیس شده: شرط مرزی جنبشی این است که سرعت جریان عمود بر سطح جسم S_B باید صفر، به صورت رابطه (12)، باشد.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \vec{V}_I \cdot \vec{n} = -(\vec{V}_A \times \vec{\omega} \times \vec{r}) \cdot \vec{n} \quad (12)$$

که $\vec{n}$ بردار واحد عمود به سمت خارج مرز است. سرعت جریان ورودی به پروانه به صورت روابط (14,13) بیان می شود.

$$\vec{V}_I(X, Y, Z) = \vec{V}_W(X, Y, Z) + \vec{\omega} \times \vec{r}(X, Y, Z) \quad (13)$$

$$\vec{V}_W(X, Y, Z) = \vec{V}_s(1 - \vec{w}(X, Y, Z)) \quad (14)$$

$\vec{V}_s$ سرعت شناور و $\vec{w}(X, Y, Z)$ فاکتور ویک شناور است.

ب) شرایط سینماتیکی و دینامیکی در دنباله: هیچ پرش سرعت جریان روی سطح ورتکس دنباله وجود ندارد، اما پرش سرعت پتانسیل در این سطح وجود دارد و برابر سیرکیولاسیون در اطراف پره است. رابطه بین سرعت جریان و سرعت پتانسیل به صورت روابط (16,15) بیان می شود.

$$(\Delta \varphi)_{S_W} = \varphi^B - \varphi^F = \Gamma \quad (15)$$

$$\left(\Delta \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{S_W} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^B - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^F = 0 \quad (16)$$

Γ و B سطوح پشت و جلوی ورتکس دنباله را نشان می دهند و F چرخش در اطراف پره است.

ج) شرط کوتا در لبه فرار: این شرط از مهم ترین شروط برای اجسام جلو برنده و یا بالابرنده است. این شرط بیان می کند که سرعت سیال در لبه فرار ثابت، رابطه (17)، می ماند.

$$|\nabla \varphi|_{TE} < \infty \quad (17)$$

تئوری شرط کوتای اذعان دارد که سرعت در امتداد لبه انتهایی محدود باقی خواهد ماند. به عنوان یک فرم معادل دیگر می توان فهمید که فشار مساوی در سطح بالایی و پایینی لبه عقبی وجود دارد. این شرط کوتای فشار مساوی برای تعیین $\Delta \varphi_z$ مجهول قدرت دو قطبی برای سطح ویک دنباله ای به کار خواهد رفت. شرط کوتای فشار در محاسبات عددی می تواند به صورت رابطه (18) بیان شود.

$$\Delta p_i = p_{TE}^U(P_j) - p_{TE}^L(P_j) = 0, j = 1, 2, \dots, N_R \quad (18)$$

3-3- روش عددی

الگوریتم مراحل کلی برای پیاده سازی روش المان مرزی مطابق شکل 3 است. این روش عبارت است از:

- 1) تولید شبکه بر پروانه و ویک دنباله ای
 - 2) تبدیل معادلات انتگرالی به معادلات جز به جز
 - 3) حل عددی انتگرال ها
 - 4) اعمال شرایط مرزی
 - 5) تشکیل سیستم معادلات و حل کمیت مورد نظر
- مراحل بالا در قالب یک کد المان مرزی پیاده سازی شد.

4- روش معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس

در روش معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس یا رانز، معادلات حاکم بر

سیال در V غیرقابل تراکم، غیریوسکوز و غیرچرخشی است. V در معرض سرعت جریان ورودی یکنواخت $\vec{V}_I$ در بالادست جریان قرار می گیرد. میدان جریان با این فرضیات حول جسم با پتانسیل سرعت مغشوش φ مشخص می شود که معادله لاپلاس را به صورت رابطه (8) ارضا می کند [16].

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (8)$$

با استفاده از تئوری گرین پتانسیل سرعت مغشوش در هر نقطه میدان می تواند به صورت معادله انتگرالی برحسب توزیع چشمه و دو قطبی نوشته شود؛ بنابراین برای نقطه میدان P پتانسیل سرعت به صورت رابطه (9) است.

$$4\pi E \varphi(P) = \iint_{S_B} \varphi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} ds - \iint_{S_B} \frac{\partial \varphi(q)}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} ds + \iint_{S_W} \Delta \varphi(q) ds \quad (9)$$

با توجه به موقعیت نقطه P مقدار E به صورت رابطه (10) تعیین می شود.

$$E = \begin{cases} 0, & S \text{ داخل} \\ \frac{1}{2}, & S \text{ روی مرز} \\ 1, & S \text{ خارج} \end{cases} \quad (10)$$

پتانسیل سرعت مغشوش بر پروانه با توجه به روابط بالا به صورت رابطه (11) بیان می شود.

$$2\pi \varphi(P) = \iint_{S_B} \varphi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} ds - \iint_{S_B} \frac{\partial \varphi(q)}{\partial n_q} \frac{1}{R(p, q)} ds + \iint_{S_W} \Delta \varphi(q) ds \quad (11)$$

این معادله بیانگر نمایش پتانسیل سرعت برحسب توزیع دوقطبی با قدرت φ روی سطح جسم S_B ، توزیع قدرت چشمه $\partial \varphi / \partial n$ روی سطح جسم S_B و توزیع دوقطبی از قدرت $\Delta \varphi$ روی سطح دنباله S_W است. حل این مسأله مقدار مرزی شامل تعیین مقاومتهای تکنیکه های قدرت¹ که نشان دهنده ویک دنباله ای پروانه و لبه فرار است به صورتی که معادله انتگرالی بالا را ارضا کند. توزیع پیوسته تکنیکه ها روی سطح پروانه و ویک دنباله ای روی المان های چهاروجهی تقریب زده می شود. از آنجایی که قدرت های چشمه ها با شرایط مرزی جنبشی توصیف می شود، تنها قدرت های دوقطبی مجهول است و باید تعیین شوند. با توجه به روابط بالا شکل مدل ویک دنباله ای باید پیش از حل معادلات مشخص باشد، بدین منظور نیاز است که شکل ویک حدس زده شود.

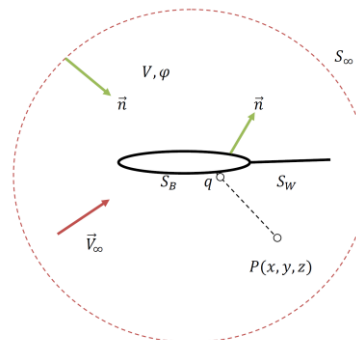


Fig. 2 The problem domain

شکل 2 میدان مسأله

¹ Strength Singularities

که به صورت گسترده ای در مدل سازی توربوماشین ها به کار می روند می توان به مدل های $k-\epsilon$ یا $k-\omega$ اشاره کرد.

5- روش ترکیبی BEM/RANS

5-1- معادلات حاکم

همان طور که در بخش مقدمه بررسی شد مدل سازی کل سیستم رانش پاددار با اجزای چرخشی و غیرچرخشی با روش رانز نیازمند مدل سازی دقیق میدان حل، شبکه بندی با تعداد سلول های زیاد و زمان محاسباتی بالاست. برای رفع برخی از این مشکلات می توان اجزای چرخشی را با یکسری نیروهای معادل جایگزین کرد. در بیشتر روش های ترکیبی این نیروها با استفاده از یک حل گر جریان پتانسیل محاسبه می شود. در حقیقت ایده اصلی استفاده از روش ترکیبی پتانسیل / ویسکوز در تحلیل سیستم های رانش استفاده هم زمان مزایا این دو روش است، یعنی زمان حل کم و دقت مناسب روش های پتانسیل برای تحلیل اجزای چرخشی به تنهایی و دقت و توانایی روش های ویسکوز در تحلیل جریان در اطراف اجزای غیرچرخشی.

در روش ترکیبی BEM/ RANS، جریان حول پروانه به وسیله روش المان مرزی محاسبه می شود، سپس از یک حل گر ویسکوز بر مبنای رانز برای تحلیل جریان حول پاد و استرات استفاده می شود. در این حالت اثر پروانه به وسیله یک توزیع پراکنده نیرو بیان می شود که به صورت نیروهای حجمی به سمت راست معادله مومنوم اضافه می شود. نیروهای تراست و گشتاور پروانه به ترتیب به صورت توزیعی از سورس ترم های مومنوم محوری و مماسی در معادلات حاکم بر جریان وارد شده و سبب شبیه سازی شتاب های محوری و دورانی ناشی از وجود پروانه می شوند. در این حالت معادلات حاکم به صورت روابط (24,25) است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + F_i \end{aligned} \quad (25)$$

F_i ترم نیروهای حجمی است.

در حالت کلی و با یک توزیع یکنواخت مطابق روابط (26,27) ترم های مومنوم با تقسیم تراست و گشتاور پروانه بر حجم پروانه مدل سازی می شوند.

$$Fb_x = \frac{T}{V} \quad (26)$$

$$Fb_\theta = \frac{Q}{rV} \quad (27)$$

که Fb_θ و Fb_x به ترتیب ترم مومنوم محوری و مومنوم مماسی است. در روش ترکیبی RANS/BEM با استفاده از روش المان مرزی توزیع فشار بر سطوح پروانه محاسبه می شود که این توزیع به صورت نیروهای حجمی بر سلول های مورد نظر در روش رانز وارد می شوند. این نیروهای حجمی به صورت سه مؤلفه f_x ، f_y و f_z در سمت معادلات رانز اضافه شده و سبب مدل سازی اثر پروانه در جریان مساله می شوند. از آن جایی که این توزیع فشار بر سطوح رخ و پشت پروانه ایجاد شده، جهت مدل سازی این توزیع فشار می توان از دو روش متفاوت استفاده کرد. در روش نخست که روشی تقریبی است با استفاده از توزیع اختلاف فشار برآیند بر سطوح رخ و پشت پروانه، یک توزیع نیروی برآیند به صورت تقریبی بر خط کمر پره محاسبه می شود. در این حالت رابطه (28) بین فشار و نیروهای حجمی برقرار است.

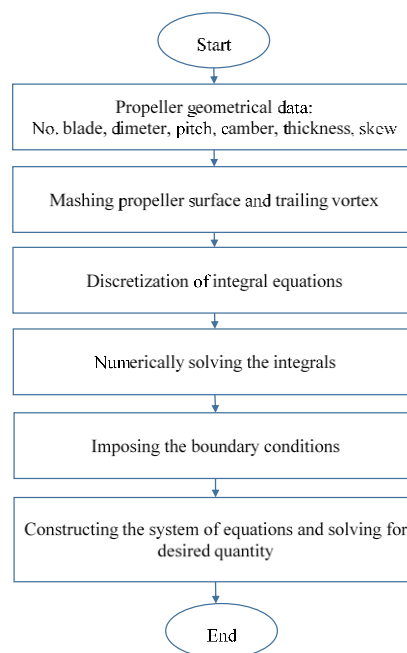


Fig. 3 Boundary element method flowchart

شکل 3 الگوریتم روش المان مرزی

جریان برای بقای جرم و مومنوم به ترتیب عبارت از روابط (19,20) است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (20)$$

$\vec{v}$ بردار سرعت، p فشار استاتیکی و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است که از رابطه (21) به دست می آید.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (21)$$

در این رابطه، μ ویسکوزیته و I تانسور واحد است. با استفاده از روش متوسط گیری، معادلات حاکم به صورت روابط (22,23) قابل بیان خواهند بود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \end{aligned} \quad (23)$$

در آن u سرعت متوسط و $-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ تانسور تنش رینولدز؛ مدل سازی تانسور تنش به نسبت مشکل است، زیرا برای تعیین آن نیاز به اطلاعات دقیقی در خصوص ساختار پدیده توربولانس در سیال داریم که غالباً در دسترس نیست؛ بنابراین برای تعیین اندازه تنش های رینولدز باید یکی از مدل های توربولانسی موجود استفاده کرد. از جمله مدل های معروف توربولانسی می توان به مدل های صفر معادله ای، یک معادله ای و دو معادله ای اشاره کرد. در مدل صفر معادله ای تنها از معادلات جبری استفاده می شود در حالی که در مدل های یک معادله ای و دو معادله ای به ترتیب از یک و دو معادله انتقال استفاده می شود. انتخاب مدل توربولانسی به فیزیک جریان مسأله مورد بررسی، میزان دقت مورد نیاز، امکانات محاسباتی و میزان زمان در اختیار برای رسیدن به پاسخ منطقی وابسته است. از مدل های توربولانسی

نباید نقاط شبکه RANS باشند. با استفاده از حل جریان حول پاد و استرات به روش RANS می توان مقدار سرعت کل را در این نقاط، در روش المان مرزی نیز می توان مقادیر سرعت های القایی را محاسبه کرد. با کاهش این سرعت ها از مقادیر سرعت کل مقدار ویک مؤثر به دست می آید. این سرعت مؤثر به عنوان شرایط ورودی پروانه در روش المان مرزی قرار داده می شوند.

3-5- الگوریتم روش ترکیبی BEM/RANS

با استفاده از روش پیشنهادی برای کوپل نتایج در روش ترکیبی BEM/RANS، می توان یک تحلیل هیدرودینامیکی کامل از سیستم رانش پاددار با در نظر گرفتن تمامی اجزای آن و اندرکنش های بین آن ها انجام داد. الگوریتم کلی برای پیاده سازی این تحلیل به روش ترکیبی BEM/RANS مطابق شکل 4 است. مراحل روش ترکیبی BEM/RANS به شرح زیر است.

- 1) تولید میدان حل سه بعدی در اطراف پاد و استرات
- 2) تحلیل جریان در اطراف پاد و استرات به روش RANS بدون در نظر گرفتن اثر پروانه (صفر قرار دادن نیروهای حجمی)
- 3) محاسبه ویک کل (T) در صفحه پروانه و فرض کردن مقدار آن به عنوان ویک مؤثر پروانه (E)
- 4) اعمال ویک مؤثر به عنوان ورودی در روش BEM
- 5) محاسبه توزیع فشار روی سطوح پروانه و بردار نیرو در هر پانل
- 6) تبدیل نیرو هر پروانه به نیروهای حجمی
- 7) اعمال نیرو حجمی در بلوک جایگزین پروانه با استفاده از روش میان یابی

- 8) تحلیل سیستم پاد و استرات به روش RANS
- 9) محاسبه سرعت ویک کل محاسبه شده به وسیله روش RANS در صفحه پروانه و کم کردن آن از سرعت های القایی محاسبه شده (I)
- به وسیله روش BEM (T-I)
- 10) کنترل همگرایی با مقایسه ضرایب KT و KQ محاسبه شده با مقادیر مرحله پیشین
- 11) جایگزین کردن (E) با (T-I) و اعمال آن به عنوان سرعت ورودی پروانه

مراحل 11-4 تا هنگامی که حل همگرا شود ادامه می یابد. در بخش ویسکوز جهت حل معادلات حاکم از نرم افزار ANSYS Fluent 14.5 که یک حل گر حجم محدود بر پایه معادلات RANS استفاده شده است. روش تفکیکی راه حل انتخاب شده برای حل معادلات بقای جرم و مومنتم است که در آن هر یک از معادلات به صورت جداگانه حل می شوند. این روش نسبت به روش حل پیوسته نیازمند زمان و حافظه کمتری در هنگام حل است. خطی سازی معادلات نیز به روش ضمنی انجام گرفته است. جهت گسسته سازی معادلات حاکم در میدان حل از روش آپویند² مرتبه دوم با دقت مناسب استفاده می شود. میان یابی فشار نیز به صورت استاندارد انجام گرفته است، همچنین برای حل هم زمان معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل³ استفاده می شود. برای شبیه سازی جریان توربولانس مدل SST $k-\omega$ به کار گرفته شد.

6- مدل سازی و روش عددی

در این قسمت با استفاده از روش ترکیبی توسعه داده شده بخش پیشین به

$$V\vec{F}_b = \Delta P \vec{n} \quad (28)$$

در آن V حجم سلول شبکه رانز، A مساحت سطح متناظر بر خط کمبر پروانه، ΔP اختلاف فشار برآیند در راستای خط کمبر پروانه، $\vec{n}$ بردار عمود بر سطح خط کمبر و $\vec{F}_b$ بردار نیروی حجمی سه بعدی است.

در روش دوم که یک روش دقیق تر و در این تحقیق از آن استفاده شده، با بهره از روش المان مرزی برای هر یک از پانل های سطوح رخ و پشت پروانه به صورت جداگانه مقدار فشار محاسبه شده است و با تبدیل آن به نیرو بردار نیرو در مرکز پانل محاسبه می شود. این بردار نیرو با استفاده از روشی که در بخش های پسین توزیع خواهد شد بر سلول های شبکه رانز توزیع می شود. در این حالت نیز رابطه بین فشار و نیروهای حجمی به صورت رابطه (29) است.

$$V\vec{F}_b = P A \vec{n} \quad (29)$$

2-2- روش انتقال و کوپل نتایج بین دو روش عددی

از دیدگاه عملی این روش ترکیبی در صورتی یک راه حل مناسب و راضی کننده خواهد بود که همان طور که اثر پروانه در تحلیل اجزای غیرچرخشی در روش ویسکوز مدل شده است، اثرات اجزای غیرچرخشی و ضرایب ویسکوز در نیروهای پروانه نیز در نظر گرفته شود؛ بنابراین برای برقراری کوپل دو روش باید دو مرحله انتقال نتایج داشته باشیم. در ادامه این بخش موضوع روش انتقال نتایج بین دو حل گر پتانسیل و ویسکوز شرح داده شده است.

5-2-1- کوپل نتایج از BEM به RANS

کوپل نتایج از روش BEM به روش رانز شامل انتقال نیروهای محاسبه شده پروانه در روش BEM به روش RANS و تبدیل آن ها به نیروهای حجمی و افزودن در معادلات حاکم به صورت ترم های مومنتم است. در روش المان مرزی به ازای هر پانل مقدار فشار در مرکز آن برای کوپل کردن نتایج بین این دو روش محاسبه شده و بردار نیرو برای هر پانل محاسبه می شود. این روش سبب می شود برای هر یک از پانل ها در سطوح پشت و رخ پروانه بردارهای نیروی جداگانه تعریف شود که این موضوع سبب دقیق تر شدن مدل سازی در روش ترکیبی می شود. این بردارهای نیرو به صورت نیروهای حجمی بر سلول های شبکه متناظر با هر پانل توزیع می شود. جهت ترکیب کردن و ارتباط دو شبکه از الگوریتم جستجوی سلول ها¹ استفاده شده است. در این روش هر پانل به نزدیک ترین سلول متناظر با آن در شبکه RANS و سلول های مجاور با آن مرتبط می شود. با توجه به این که در شبکه RANS هندسه پروانه مدل نمی شود می توان از یک شبکه ساده شطرنجی با فواصل یکسان در محدوده قرارگیری پروانه استفاده کرد.

5-2-2- کوپل نتایج از RANS به BEM

کوپل نتایج از روش RANS به روش BEM شامل انتقال ویک سرعت مؤثر جریان در صفحه پروانه و انتقال آن به روش BEM به عنوان جریان ورودی به پروانه است. این پروسه شامل محاسبه مقدار سرعت کل در صفحه پروانه در روش RANS و کم نمودن مقدار سرعت های القایی پروانه محاسبه شده از آن است. برای انتقال سرعت در بین این دو روش در مرحله نخست یک صفحه فرضی دایروی به قطر پروانه در فاصله حدود $0.1D$ تا $0.2D$ از پروانه در بالادست آن با عنوان صفحه انتقال تعریف شده است. در این صفحه انتقال یکسری نقاط مبنا در شعاع ها و زوایای مختلف تعریف شده اند. این نقاط مبنا

² Upwind
³ SIMPLE

¹ Cell search algorithm

جدول 2 مشخصات ابعادی پاد و استرات

Table 2 Main dimensions of pod and strut

پارامتر	مقدار
حداکثر قطر پاد (میلی متر)	139
طول پاد (میلی متر)	410
ارتفاع استرات (میلی متر)	300
طول کورد استرات (میلی متر)	225
عرض استرات (میلی متر)	60
فاصله صفحه پروانه تا استرات (میلی متر)	100
طول مخروطی ابتدایی پاد (میلی متر)	85
زاویه مخروطی ابتدایی پاد (درجه)	15
طول مخروطی انتهایی پاد (میلی متر)	110
زاویه مخروطی انتهایی پاد (درجه)	25

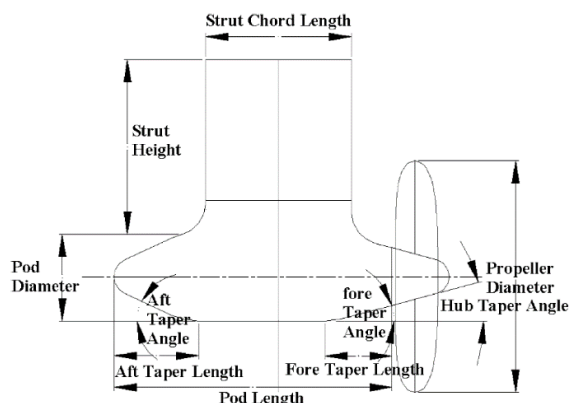


Fig. 5 Podded drive view

شکل 5 نمایی از سیستم رانش پادار

پانل بندی شامل سطح رخ و پشت پروانه و ویک دنباله ای است. ویک دنباله ای نیز دارای طولی برابر با دو گام پروانه، تعداد پانل های ویک دنباله ای هم 2280 عدد است (شکل 6).

پروانه با یکسری از بلوک های استوانه ای در میدان حل برای استفاده از روش ترکیبی در بخش ویسکوز جایگزین می گردد. میدان حل حول سیستم رانش پادار شامل یک ناحیه کلی استوانه ای شکل ثابت است. بلوک جایگزین پروانه به صورت یک بلوک استوانه ای با قطری برابر با قطر پروانه و عرض $\Delta x = 0.25D$ مدل شده است. طول قسمت ورودی و خروجی میدان تا بلوک پروانه به ترتیب $2.5L_{POD}$ و $5L_{POD}$ ، قطر استوانه نیز $6L_{POD}$ فرض شده است. شکل 7 ابعاد میدان حل برای سیستم پادار را نشان می دهد. مطابق این شکل ها میدان حل به یازده بلوک تقسیم بندی شده است.

در این بررسی از شبکه سازمان یافته در بلوک پروانه و شبکه بی سازمان در مابقی بلوک ها استفاده شده است. کل میدان نیز با استفاده از المان های چهار وجهی شبکه بندی شده است. برای بررسی اثر تعداد المان های شبکه بر پاسخ های مساله، یک تحلیل استقلال از شبکه بر پاد صورت پذیرفته است. برای شش شبکه با اندازهای سلول های متفاوت مطابق جدول 3 مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی در شکل 8 ارائه شده است. این نتایج شامل درصد خطای نسبی برای ضریب نیروهای محوری در سرعت پیشروی $J=0.2$ در مقایسه با نتایج تجربی است [20].

براساس نتایج به دست آمده هم زمان با افزایش تعداد سلول های شبکه مقادیر درصد خطای نسبی کاهش یافته است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر خطا در حالت های 4 و 5 تقریباً ثابت مانده و با افزایش تعداد سلول ها

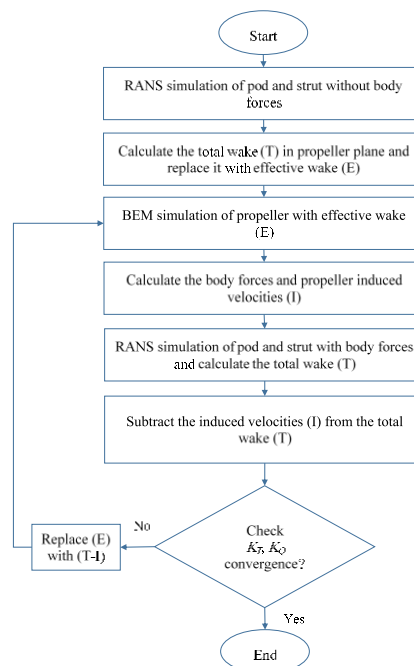


Fig. 4 BEM/RANS coupled method flowchart

شکل 4 الگوریتم روش ترکیبی BEM/RANS

تحلیل یک سیستم رانش پادار پرداخته شود. مدل سیستم رانش پادار مورد بررسی مطابق سیستم رانش استفاده شده توسط اسلام و همکاران است [19]. پروانه این سیستم رانش از خانواده سری DTMB انتخاب و دارای مقطع NACA 66 اصلاح شده است. این پروانه چهارپره ای بدون زوایای ریک و اسکيو با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول 1 است.

ابعاد پاد و استرات مورد استفاده به گونه ای انتخاب شده که متوسطی از ابعاد سیستم های رانش پادار مورد استفاده در دنیا باشد. مشخصات ابعادی پاد و استرات این مدل در جدول 2 ارائه شده است. شکل 5 نیز نمایی از این مدل سیستم رانش پادار را نشان می دهد.

در ادامه این بخش مبادرت به مدل سازی و تشکیل میدان حل پرداخته شده، این شبکه بندی در دو بخش روش المان مرزی و روش RANS به صورت جداگانه صورت پذیرفته است.

در روش المان مرزی پروانه به همراه ویک دنباله ای پانل بندی شده است. در نخستین مرحله شبکه بندی روی سطوح رخ و پشت پروانه صورت می پذیرد. هریک از پره های پروانه شبکه به 19 پانل در جهت شعاعی و 19 پانل در جهت طول کورد پره تقسیم بندی می شود. تعداد کل پانل های پروانه 2888 است. تویی پروانه نیز با تعداد 475 پانل شبکه بندی شده است. این

جدول 1 ابعاد اصلی مدل پروانه

Table 1 Main dimensions of propeller model

پارامتر	مقدار
نوع مقطع پره	NACA 66
تعداد پره های پروانه	4
قطر پروانه (میلی متر)	270
نسبت گام به قطر پروانه	0.26
نسبت تویی پروانه	1
نسبت سطح توسعه یافته پروانه	0.6
زاویه ریک (درجه)	Zero
زاویه اسکيو (درجه)	Zero

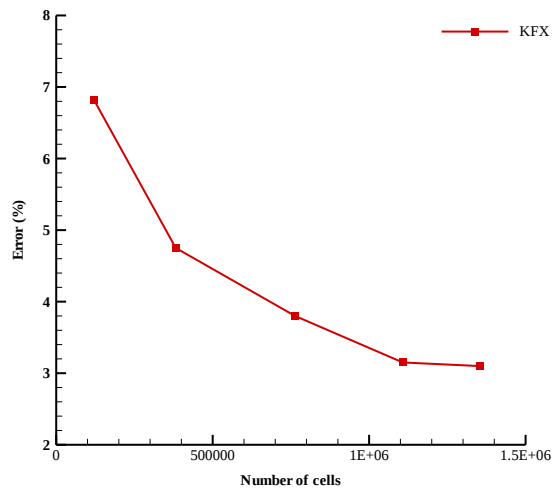


Fig. 8 Variation of error value of axial force coefficients with increasing the number of cells at $J=0.2$

شکل 8 نمودار تغییرات مقادیر خطا ضریب نیروی محوری با افزایش تعداد سلولها در سرعت پیشروی $J=0.2$

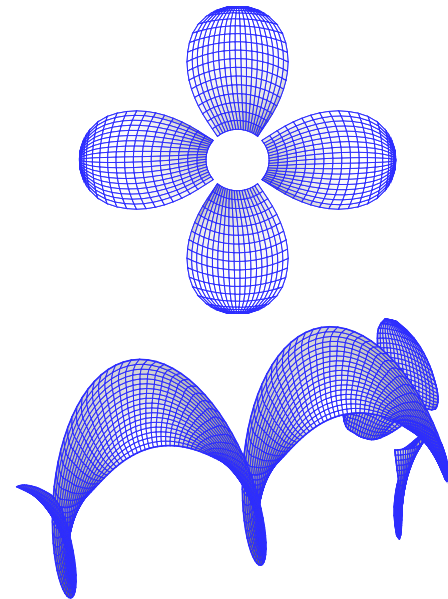


Fig. 6 Podded drive view

شکل 6 توزیع پانل های شبکه روی سطوح پروانه و ویک دنباله ای

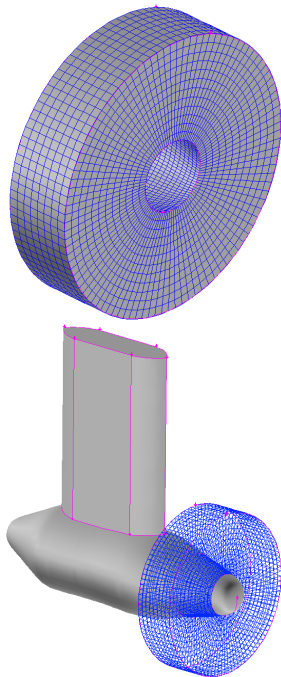


Fig. 9 Cylindrical block instead of Propeller in RANS/BEM method

شکل 9 جایگزینی پروانه با بلوک استوانه ای در روش RANS/BEM

جدول 3 مشخصات ابعادی پاد و استرات

Table 3 Element number of grid dependency cases

تعداد سلولها	حالت
120,157	1
381,981	2
763,152	3
1,107,495	4
1,353,291	5

عرض $\Delta x = 0.25D$ مدل شده است. این ابعاد براساس نتایج به دست آمده در کارهای عددی در خصوص تحلیل هیدرودینامیکی سیستم رانش پاددار انتخاب [22,21]، مشخصات میدان حل در شکل 10 نشان، میدان حل میدان

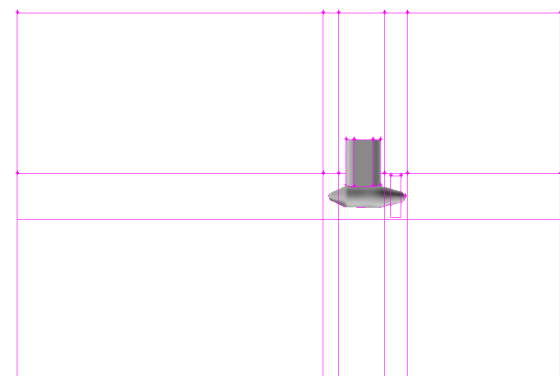


Fig. 7 Field Domain around Podded drive in RANS/BEM method

شکل 7 مدل سازی میدان حل حول سیستم پاددار در روش RANS/BEM

کاهش نیافته است؛ بنابراین حالت 4 به عنوان مدل نهایی جهت ادامه محاسبات انتخاب شده است.

شرایط مرزی مساله به صورت شرط جریان ورودی برای ورودی ناحیه ساکن، فشار خروجی برای خروجی ناحیه ساکن، شرط مرزی دیواره برای سطوح پاد و استرات انتخاب شده است. تنظیمات حل مطابق حالت تحلیل پاد و استرات انتخاب و از مدل SST $k-\omega$ برای شبیه سازی جریان آشفته استفاده شد. شکل 9 بلوک سیلندری جایگزین شده با پروانه را نشان می دهد.

7- نتایج عددی

7-1- معتبر سازی روش مدل سازی اثر پروانه

در مرحله نخست با هدف بررسی دقت روش ترکیبی RANS/BEM و معتبر سازی نتایج آن با استفاده از این روش به تحلیل هیدرودینامیکی یک پروانه به تنهایی پرداخته شده است. در این مطالعه میدان حل در روش RANS تنها شامل یک ناحیه استوانه ای شکل ثابت به همراه یک بلوک جایگزین پروانه است. بر این اساس طول قسمت ورودی $4D$ و طول قسمت خروجی $6D$ در نظر گرفته، قطر استوانه نیز $4D$ فرض شده است. بلوک جایگزین پروانه به صورت یک بلوک استوانه ای با قطری برابر با قطر پروانه و

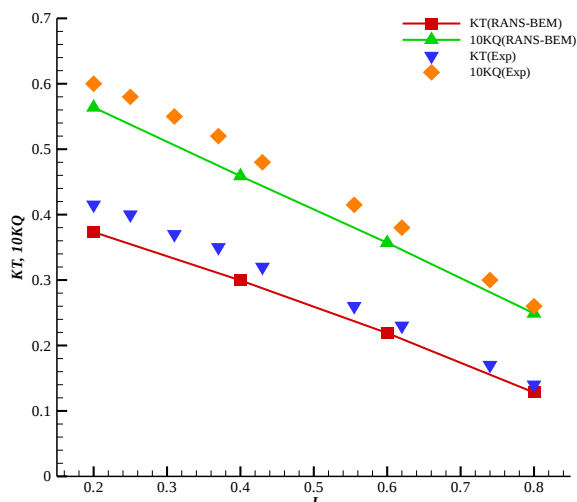


Fig. 11 Computational and experimental results of thrust and torque coefficient of single propeller

شکل 11 مقایسه نتایج عددی و تجربی ضرایب تراست و گشتاور برای پروانه تنها

جدول 4 درصد خطای نسبی روش ترکیبی RANS/BEM برای پروانه تنها

Table 4 Relative error of RANS/BEM method for single propeller

J	K_T	K_Q
0.2	-3.85	-4.18
0.4	-4.14	-5.03
0.6	-4.56	-5.62
0.8	-5.39	-6.21

کرد که این روش ترکیبی یک حل با دقت میانگین در مقایسه با دو روش بالاست. هر چند دقت این روش نسبت به روش المان مرزی بهبود یافته، اما دقت آن از روش ویسکوز کامل کمتر است. کاهش زمان مدل سازی و حل مهم ترین مزیت این روش نسبت به روش ویسکوز که در جدول 5 به آن اشاره شده است. این جدول شامل زمان های لازم برای ایجاد شبکه، تنظیمات شرایط فیزیکی مساله و زمان حل نهایی است که برای تحلیل پروانه به روش ترکیبی RANS/BEM و روش RANS [13] نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود روش ترکیبی نیازمند زمان محاسباتی کمتری نسبت به روش RANS در بخش های مدل سازی شبکه و حل نهایی است.

در ادامه برای درک بهتری از این روش ترکیبی و نشان دادن اثر اعمال نیروهای پروانه به صورت حجمی در روش RANS میدان سرعت در میدان پایین دست محل فرضی پروانه مورد مطالعه قرار گرفته است. توزیع نسبت سرعت های محوری و مماسی در صفحه $X/D=0.25$ در پایین دست پروانه که به صورت متوسط گیری شده در راستای شعاعی پروانه محاسبه شده در شکل های 12، 13 ارائه و این نتایج به روش حل RANS [13] با نتایج به دست آمده مقایسه شده است.

همان طور که مشاهده می شود هم خوانی تقریبی بین نتایج روش ترکیبی RANS/BEM با نتایج RANS برقرار است. روش RANS/BEM با دقت مناسبی سرعت های محوری و مماسی را در پایین دست جریان پیش بینی کرده است. دلیل اختلاف موجود بین نتایج نمودارهای سرعت در دو حالت

جدول 5 زمان محاسباتی روش ترکیبی RANS/BEM و RANS برای تحلیل پروانه
Table 5 Computational time for RANS and RANS/BEM method for single propeller analysis

روش حل	مشتبندی (ساعت)	فیزیک (ساعت)	زمان اجرا (ساعت)
RANS	10	1	5
RANS/BEM	3	1	1

حل مطابق شکل به شش بلوک تقسیم بندی شده است.

در این بررسی نیز از شبکه سازمان یافته در بلوک پروانه و شبکه بی سازمان در مابقی بلوک ها استفاده، کل میدان نیز با استفاده از المان های چهار وجهی شبکه بندی شده و تعداد سلول ها میدان در این حالت در حدود 300,000 است. شرایط مرزی مساله به صورت شرط جریان ورودی برای ورودی ناحیه ساکن، فشار خروجی برای خروجی ناحیه ساکن انتخاب شده است. تنظیمات حل مطابق حالت تحلیل پروانه تنها انتخاب و از مدل $k-\omega$ SST برای شبیه سازی جریان آشسته استفاده شده است.

با استفاده از این مدل شبیه سازی ها جریان حول پروانه تنها به روش ترکیبی در سرعت های پیشروی $J=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ صورت پذیرفت. در این حل ترکیبی پروانه، ابتدا پروانه به روش المان مرزی تحلیل شده است، سپس توزیع فشار روی سطوح پروانه طبق الگوریتم توضیح داده شده در بخش 3-5 به نیروهای حجمی تبدیل و در شبکه مربوطه نشان و در شکل 10 اعمال شده است.

در ادامه شکل بالا با اثر نیروهای حجمی به روش RANS حل شده و میدان سرعت به دست می آید. میدان سرعت در صفحه فرضی قرار گیری پروانه محاسبه شده و به عنوان مقادیر سرعت ورودی به روش المان مرزی اعمال می شود. این روند حل ترکیبی و سیکل انتقال نتایج براساس الگوریتم بخش 3-5 تا همگرایی حل ادامه می یابد. معیار همگرایی و معتبر سازی روش در این قسمت ضرایب تراست و گشتاور پروانه است. این مقادیر در شکل 11 به صورت نمودار نشان داده و با مقادیر تجربی مقایسه، همچنین خطای نسبی بین نتایج روش ترکیبی با مقادیر تجربی در جدول 4 بیان شده است. همان طور که مشاهده شد تطابق مناسبی میان نتایج برقرار و روش ترکیبی با دقت قابل پذیرشی مقادیر تراست و گشتاور پروانه را پیش بینی کرده است، همچنین درصد بیشینه خطای بین نتایج به دست آمده در حدود 6% است، هر چند خطای ضرایب تراست پروانه بیش از ضرایب گشتاور آن است. در هر ضریب پیشروی مقدار درصد خطای ضریب تراست پروانه بیش از ضریب گشتاور آن و این موضوع در ضرایب پیشروی بالا مشهودتر است. در اجسام برآ¹ مانند پروانه اثر ویسکوزیته بر تراست کمتر است، در حالیکه تأثیر گذاری زیادی بر گشتاور دارد. در نتیجه دقت پیش بینی ضریب گشتاور وابسته به پیش بینی بهتر نیروی درگ بر پره های پروانه است.

با بررسی کلی میان نتایج روش ترکیبی RANS/BEM برای یک پروانه تنها با نتایج حل ویسکوز [13] و روش المان مرزی [23] می توان استدلال

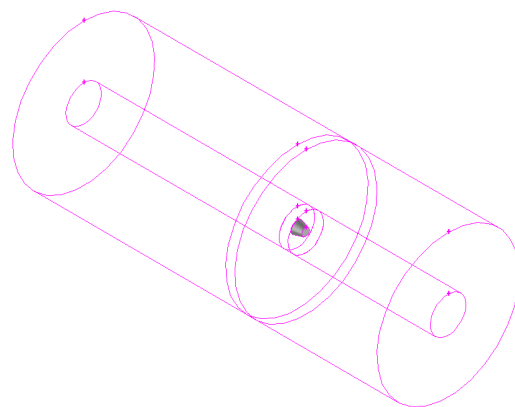


Fig. 10 Field Domain around single propeller in RANS/BEM method
شکل 10 مدل سازی میدان حل حول پروانه در روش RANS/BEM

¹ Lifting bodies

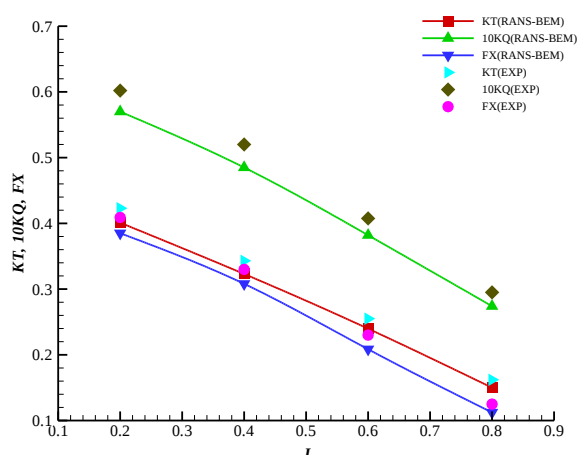


Fig. 14 Computational and experimental results of thrust, torque and axial force coefficient in straight condition.

شکل 14 مقایسه نتایج عددی و تجربی ضرایب تراست و گشتاور و نیروی محوری

جدول 6 درصد خطای نسبی روش ترکیبی RANS/BEM

Table 6 Relative error of RANS/BEM method

J	K_T	K_Q	K_{FX}
0.2	-5.20	-5.32	-5.87
0.4	-5.83	-6.73	-6.67
0.6	-5.96	-6.26	-9.35
0.8	-7.41	-7.12	-10.16
Ave.	-6.10	-6.36	-8.01

پادمشهودتر است. به صورت کلی درصد خطای نسبی برای ضرایب نیروی محوری در سرعت‌های پیشروی بیشتر از ضرایب تراست و گشتاور است. دلایل اصلی این افزایش اختلاف در نتایج را می‌توان اثرات ویسکوزیته و اندرکنش جریان بین اجزای سیستم رانش پاددار به ویژه در سرعت‌های بالا دانست. ویسکوزیته نقش تعیین‌کننده‌ای در نیروهای محوری و جانبی ناشی از پاد و استرات دارد؛ بنابراین تخمین دقیق از اثرات ویسکوزیته برای پیش‌بینی نیروهای محوری و جانبی ضروری است.

توزیع نسبت سرعت‌های محوری و مماسی در سرعت پیشروی $J=0.2$ و در صفحه $X/D=0.25$ در پایین دست پروانه که به صورت متوسط‌گیری شده در راستای شعاعی پروانه محاسبه شده در شکل‌های 15، 16 برای سیستم رانش پاددار ارائه شده است. این نتایج در روش حل RANS با نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شده و هم‌خوانی تقریبی بین نتایج روش ترکیبی RANS/BEM با نتایج RANS برقرار است.

از آنجایی که نتایج تجربی برای این سرعت‌ها وجود ندارد، مبنای مشخصی برای مقایسه نتایج سرعت‌های پایین دست جریان در روش ترکیبی و روش RANS وجود ندارد؛ بنابراین نمی‌توان درصد خطای این دو روش را نسبت به حالت تجربی بیان کرد و و بهترین راه برای مقایسه و معتبرسازی نتایج مقایسه و بررسی ضرایب تراست و گشتاور پروانه که در بالا توضیح داده شده است. اثر ورتکس ناشی از تویی پروانه و لبه‌های پره در نتایج روش ترکیبی مشهود است. علاوه بر این موضوع پاد و استرات در سیستم رانش پاددار در پایین دست جریان قرار دارند و در نتیجه معرض جریان غیریکنواخت خروجی از پروانه قرار می‌گیرند. وجود پروانه سبب ایجاد شتاب در جریان پایین دست می‌شود. سرعت‌های القایی پروانه جریان یکنواخت ورودی به پاد و استرات را تغییر می‌دهند که این موضوع سبب توزیع فشار نامتقارن بر پاد و استرات می‌شود. جریان خروجی از پروانه در سرعت‌های بالا

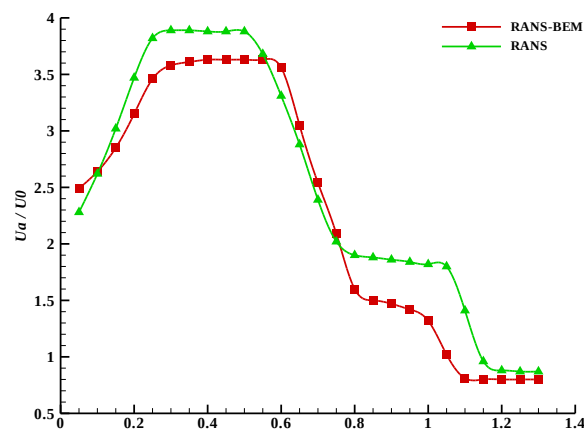


Fig. 12 Axial velocity ratio in $X/D=0.25$, $J=0.25$

شکل 12 مقایسه نسبت سرعت محوری در $J=0.2$ و $X/D=0.25$

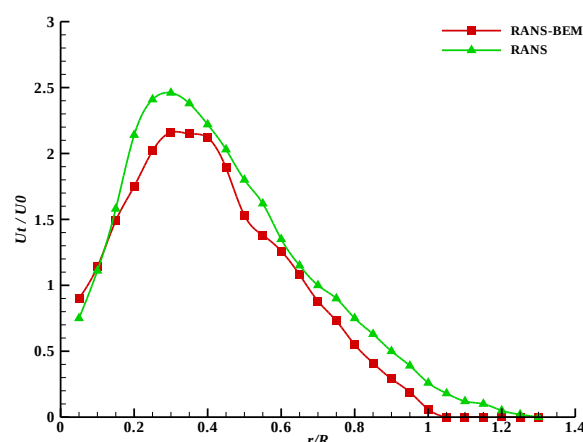


Fig. 13 Tangential velocity ratio in $X/D=0.25$, $J=0.25$

شکل 13 مقایسه نسبت سرعت مماسی در $J=0.2$ و $X/D=0.25$

ترکیبی و RANS را می‌توان به دلیل عدم مدل‌سازی پروانه در بخش ویسکوز روش ترکیبی دانست. این موضوع به خصوص در محدوده $r/R=0.2\sim 0.3$ محل قرارگیری تویی پروانه و همچنین در محدوده $r/R=1.0\sim 1.2$ محدوده لبه انتهایی پره‌های پروانه بیشتر مشهود است. در این قسمت‌ها به علت عدم پیش‌بینی صحیح ورتکس‌های چرخشی ناشی از تویی و لبه‌های پروانه اختلاف بیشتری بین نتایج روش ترکیبی با روش RANS وجود دارد.

7-2- تحلیل کل سیستم رانش پاددار در جریان مستقیم

در این بخش تحلیل هیدرودینامیکی کل سیستم رانش پاددار کششی در جریان مستقیم با استفاده از روش پیشنهادی RANS/BEM مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی‌ها در محدوده سرعت‌های پیشروی $0.2\sim 0.8$ انجام شده است. شکل 14 روند تغییرات ضرایب تراست، گشتاور و نیروی محوری سیستم پاد کششی و فشاری را در مقایسه با نتایج تجربی در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهند، همچنین درصد خطای نسبی این روش ترکیبی جدول 6 ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط خطای نسبی برای ضرایب تراست و گشتاور در سیستم پاد کششی در محدوده 6% است، این مقادیر خطا برای نیروی محوری پاد 8% است. براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دریافت که روش پیشنهادی به درستی توانایی پیش‌بینی عملکرد سیستم پاددار را دارد. این موضوع در خصوص ضرایب تراست پروانه و نیروی محوری سیستم

جدول 7 زمان محاسباتی روش های عددی برای تحلیل سیستم رانش پاددار

Table 7 Computational time of numerical methods for podded drive analysis			
روش حل	مش بندی (ساعت)	فیزیک (ساعت)	زمان اجرا (ساعت)
RANS	15	1	8
URANS	20	1	50
RANS/BEM	5	1	4

محاسباتی بیشتری نسبت به روش ترکیبی RANS/BEM است. روش ترکیبی RANS/BEM یک راه حل بهینه بوده که دارای دقت مناسب بوده و از زمان حل کمتری نسبت به این دو روش برخوردار است.

این روش ترکیبی را می توان در مساله های مختلف با هندسه های متفاوت استفاده کرد. کاربرد اصلی این روش را می توان تحلیل جریان حول اجسام با اجزای غیرچرخشی و چرخشی در کنار یکدیگر دانست. تحلیل مقاومت بدنه کشتی ها و زیردریایی با حضور پروانه و سکان های افقی و عمودی، سیستم رانش پروانه های نازل دار، تحلیل عملکرد ربات های زیرآبی و تحلیل توربین های جریان دریایی را می توان از مهم ترین مسائل دریایی مشابه دانست.

8- جمع بندی و نتیجه گیری

این تحقیق بر آن است یک روش عددی ترکیبی بر مبنای دو روش المان مرزی و حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس، برای شبیه سازی عملکرد سیستم رانش پاددار دارای اجزای چرخشی و غیرچرخشی را در کنار یکدیگر، همراه با مروری بر محاسن و معایب روش های پتانسیل و ویسکوز استفاده شده در تحلیل هیدرودینامیکی سیستم های رانش پاددار ارائه کند. جریان در این روش ترکیبی حول پروانه به وسیله روش المان مرزی محاسبه و سپس از یک حل گر ویسکوز بر مبنای RANS برای تحلیل جریان حول پاد و استرات استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که روش ترکیبی RANS/BEM دارای توانایی بالایی در تحلیل های هیدرودینامیکی پیش برنده های دریایی با هندسه های پیچیده با اجزای چرخشی و غیرچرخشی است. در این مطالعه اثر پروانه در روش ویسکوز به صورت نیروهای حجمی با استفاده از روش ترکیبی RANS/BEM شبیه سازی می شود و مدل سازی دقیق میدان حل و شبکه بندی با تعداد سلول های زیاد در اطراف اجزای چرخشی مورد نیاز نیست. در این روش می توان اجزای چرخشی را با یکسری نیروهای معادل جایگزین کرد. نیروهای تراست و گشتاور پروانه به ترتیب به صورت توزیعی از سورس ترم های مومنوم محوری و مماسی در معادلات حاکم بر جریان وارده شده و سبب شبیه سازی شتاب های محوری و دورانی ناشی از وجود پروانه می شوند. همان طور که می توان اثر پروانه را در تحلیل اجزای غیرچرخشی در روش ویسکوز مدل کرد، اثرات اجزای غیرچرخشی و ضرایب ویسکوز را با استفاده از دو سیکل انتقال نتایج در این روش ترکیبی نیز می توان در روش المان مرزی و نیروهای پروانه نیز در نظر گرفت در تحلیل سیستم های رانش پاددار به روش ترکیبی RANS/BEM به صورت هم زمان از مزایای دو روش پتانسیل و ویسکوز استفاده شده است. در واقع زمان حل کم و دقت مناسب برای تحلیل پروانه به تنهایی در روش پتانسیل، و دقت و توانایی تحلیل جریان اطراف پاد و استرات در روش ویسکوز از مزایای این روش ها در استفاده هم زمان آن هاست.

9- تقدیر و تشکر

این محاسبات با همکاری و پشتیبانی مرکز تحقیقات پردازش های فوق سریع^۲

^۲ High Performance Computing Research Centre

سبب ایجاد جریان های گردابی و جدایی جریان در پاد و استرات می شود. این موضوع در تحلیل به روش RANS با دقت بالایی شبیه سازی شده است در حالی که روش ترکیبی به علت تحلیل پروانه به روش المان مرزی و استفاده از یک ویک چرخشی پیشنهادی قابلیت پیش بینی دقیق میدان در پایین دست جریان را ندارد. هر چند در نظر گرفتن یک سیکل بسته در روش ترکیبی و انتقال نتایج و سرعت ها بین این دو روش تا حدودی حل بهبود یافته، اما از دقت کمتری نسبت به روش ویسکوز برخوردار است.

در انتهای این بخش زمان حل روش ترکیبی RANS/BEM برای تحلیل سیستم رانش با کارهای عددی انجام شده برای همین مدل هندسی به روش ویسکوز با شرایط فیزیکی مشابه مقایسه و در جدول 5 نشان داده شده است. این کارهای عددی مشابه شامل تحلیل در شرایط یکنواخت به روش RANS [13] و تحلیل عددی در شرایط غیریکنواخت URANS با مش های لغزان^۱ [14] است. زمان های ارائه شده شامل زمان های صرف شده در بخش های مدل سازی میدان حل و تولید شبکه، زمان لازم برای تنظیم شرایط فیزیکی مساله و در نهایت زمان حل مساله به ازای یک سرعت پیشروی مشخص است. همان طور که مشاهده می شود زمان مورد نیاز برای مدل سازی و تولید شبکه در روش های RANS و URANS به ترتیب در حدود 3 و 4 برابر روش ترکیبی RANS/BEM است. این موضوع در خصوص زمان حل مساله نیز صادق است. روش های RANS و URANS دارای زمان

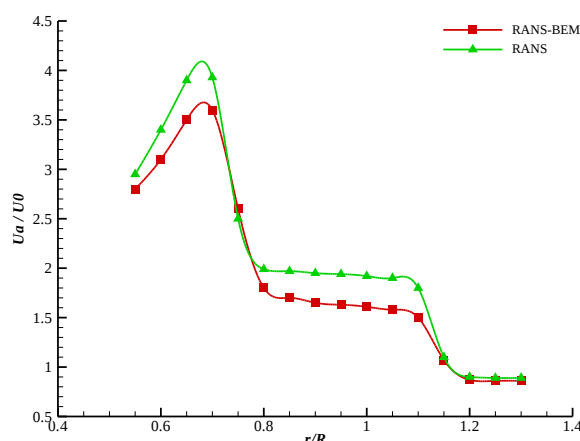


Fig. 15 Axial velocity ratio in $X/D=0.25$, $J=0.25$

شکل 15 مقایسه نسبت سرعت محوری در $X/D=0.25$ و $J=0.2$

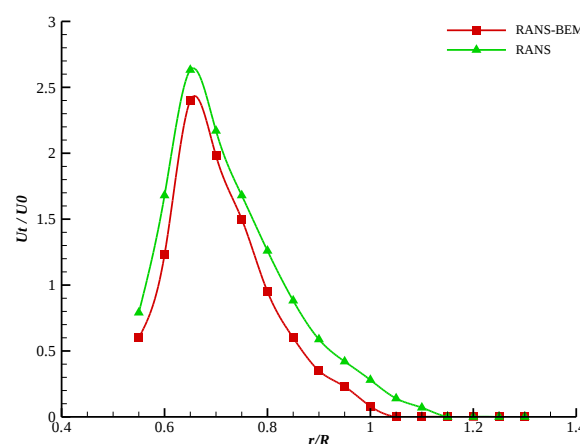


Fig. 16 Tangential velocity ratio in $X/D=0.25$, $J=0.25$

شکل 16 مقایسه نسبت سرعت مماسی در $X/D=0.25$ و $J=0.2$

^۱ Sliding mesh

دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفته که قابل تقدیر و تشکر است.

10- مراجع

- incompressible viscous flow around a tractor thruster using a sliding-mesh technique, *Proceedings of 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, France, July, 1999.
- [12] H.Amini, S. Steen, Shaft loads on a zimuth propulsors in oblique flow and waves, *Maritime Engineering*, Vol. 153, Part A1, pp. A9-A21, 2011.
- [13] R. Shamsi, H. Ghassemi, D. Molyneux, P. Liu, Numerical hydrodynamic evaluation of propeller (with hub taper) and podded drive in azimuthing conditions, *Ocean Engineering*, Vol. 76, No. 1, pp. 121-135, 2014.
- [14] R. Shamsi, H. Ghassemi, Time-Accurate Analysis of the Viscous Flow Around Puller Podded Drive Using Sliding Mesh Method, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 137, No. 1, p.011101, 2015.
- [15] J.M. Laurens, Unsteady hydrodynamic behaviour of a rudder operating in the propeller slipstream, *Ship Technology Research*, Vol 50, No. 3, pp.141-148, 2003.
- [16] L. Morino, C. C. Kuo, Subsonic potential aerodynamic for complex configuration: a general theory, *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 191-197, 1974.
- [17] J. E. Kerwin, S. A. Kinnas, J. T. Lee, W.Z. Shih, A surface panel method for the hydrodynamic analysis of ducted propellers, *Transactions of SNAME 95*, pp. 93-122, 1987.
- [18] T. Hoshino, Hydrodynamic analysis of propellers in steady flow using a surface panel method, *the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 165, No. 6, pp. 55-70, 1989.
- [19] M. Islam, B. Veitch, A. Akinturk, N. Bose, P. Liu, Performance study of podded propulsor in static azimuthing conditions, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 56, No. 3, pp. 135-157, 2009.
- [20] R. Shamsi, H. Ghassemi, Numerical investigation of yaw angle effects on propulsive characteristics of podded propulsors. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 287-301, 2013.
- [21] R. Shamsi, H. Ghassemi, Hydrodynamic analysis of puller and pusher of azimuthing podded drive at various yaw angles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 228, No. 1, pp.55-69, 2014.
- [22] A. Vali, B. Saranjam, R. Kamali, A. Rabiee, Numerical Analysis of the propeller performance close to water surface, *Moades Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 291-299, 2016. (in Persian فارسی)
- [23] R. Shamsi, H. Ghassemi, Numerical study of podded Drives using Boundary Elements Methods, *Proceedings of 3rd Applied Hydrodynamic conference*, Tehran, Iran, February 24, 2016. (in Persian فارسی)
- [1] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*, Second Edition, pp. 345-353, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [2] J. Carlton, Podded propulsors: some results of recent research and full scale experience, *Marine Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-14, 2008.
- [3] S.A. Kinnas, Prediction of Performance and Design of Propulsors-Recent Advances and Applications, *Proceedings of 2nd T-POD Conference*, Brest, France, October 3-5, 2006.
- [4] H. Ghassemi, Hydrodynamic Characteristics of Marine Propeller in Steady and Unsteady Wake Flow, *Science and Technology of AmirKabir*, Vol.14, No.54-B, 2003/2016. (in Persian فارسی)
- [5] F. Paris, d J. Cañas, *Boundary element method: fundamentals and applications*, pp. 1-5, Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [6] J.T. Katsikadelis, *Boundary Elements: Theory and Applications*, pp. 1-5, Oxford: Elsevier, 2002.
- [7] H. Ghassemi, A. Allievi, A computational method for the analysis of fluid flow and hydrodynamic performance of conventional and podded propulsion systems, *Oceanic Engineering International*, Vol. 3, No. 1, pp. 101-115, 1999.
- [8] A. S. Achkinadze, A. Berg, V. I. Krasilnikov, I. E. Stepanov, Numerical analysis of podded and steering systems using a velocity based source boundary element method with modified railing edge, *Proceeding of the Propellers/Shafting'2003 Symposium*, Virginia Beach, VA, USA, September, pp. 17-18, January 2003.
- [9] P. Liu, A. Akinturk, M. He, M. Islam, B. Veitch, Hydrodynamic performance evaluation of an ice class podded propeller under ice interaction, *ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal, pp. 669-676, January, 2007.
- [10] P. Liu, M. Islam, M. B. Veitch, Unsteady hydromechanics of a steering podded propeller unit, *Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 12-13, pp. 1003-1014, 2009.
- [11] A.Sanchez-Caja, P. Rautahaimo, T. Siikonen, Computation of the