

# شبیه‌سازی عملکرد هیدرودینامیکی پیش‌برنده‌های دریایی با کمک روش ترکیبی تئوری مومنتوم المان پره و حل معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس

رضا شمس<sup>۱\*</sup>، حسن قاسمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ shamsi@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ gasemi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶	شبیه‌سازی عددی عملکرد هیدرودینامیکی پیش‌برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده همانند سیستم‌های رانش پاددار، پروانه‌های نازل‌دار و سیستم‌های واترجت در مقایسه با تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌های معمولی از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار هستند. این موضوع سبب بکارگیری و توسعه روش‌ها و تکنیک‌های عددی در تحلیل هیدرودینامیکی پیش‌برنده‌های دریایی شده‌است. روش ترکیبی تئوری مومنتوم المان پره و حل عددی معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس یک روش مناسب جهت شبیه‌سازی عملکرد هیدرودینامیکی در این نوع هندسه‌های پیچیده که دارای اجزای چرخشی و غیرچرخشی در کنار یکدیگر هستند می‌باشد. هدف اصلی این مقاله توسعه این روش ترکیبی و استفاده از آن در تحلیل عددی سیستم رانش پاددار است. بدین منظور جریان حول پروانه به وسیله تئوری مومنتوم المان پره مدل‌سازی شده و اثر آن تنها با تغییر در سرعت و فشار جریان سیال در محل قرارگیری پروانه بوسیله نیروهای حجمی در روش ویسکوز بیان گردیده است. سپس جریان حول اجزای ثابت سیستم پیش‌برنده به کمک روش ویسکوز شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصله شامل نیروها و گشتاورهای پروانه و نیروی محوری وارده بر کل سیستم رانش پاددار است. در ادامه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده است و دقت این روش ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفته است.
کلمات کلیدی: پیش‌برنده‌های دریایی روش ترکیبی تئوری مومنتوم المان پره معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس	

## Numerical Analysis of Marine Propulsors Using Coupled BEMT/RANS Method

Reza Shamsi<sup>1\*</sup>, Hassan Ghassemi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PhD, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology; shamsi@aut.ac.ir

<sup>2</sup> Professor, Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology; gasemi@aut.ac.ir

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 11 Sep. 2016

Accepted: 4 Feb. 2017

#### Keywords:

Marine Propulsors

Blade Element Momentum Theory

RANS Method

Coupled Method

### ABSTRACT

Hydrodynamic analysis of marine propulsors with complex geometry such as podded drive systems, ducted propellers, and waterjet systems are more complicated than conventional propeller systems. This fact has caused the usage and development of numerical methods and techniques. The hybrid method to couple the Blade Element Momentum Theory (BEMT) with Reynolds-Averaged Navier Stokes method (RANS) is a powerful tool to calculate the hydrodynamic characteristics of marine propulsors with rotating and fix parts. The main purpose of this paper is developing a BEM/RANS coupled method and using it for numerical simulation of podded drive systems. In this approach, the flow around propeller is simulated by BEMT and its effects are substituted in RANS method by a set of equivalent forces which called body force. Then the flow around the fixed parts of propulsors are modelled by RANS solver. The results include the propeller thrust, the propeller torque, and the axial force. The results obtained by coupled method are compared to and verified by the experimental data.

## ۱ - مقدمه

در دهه‌های اخیر تقاضا برای شناورهای با سرعت بالا در بخش‌های نظامی و تجاری دارای روند رو به رشدی بوده است. این موضوع سبب طراحی پیش‌برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده گردیده است که دارای راندمان بالاتر، ارتعاشات و نویز کمتر و قابلیت عملکرد مطمئن‌تر هستند. سیستم‌های رانش پادار، پروانه‌های نازل دار و سیستم‌های واتر جت نمونه‌های از طرح‌های موفق در این زمینه هستند. تحلیل هیدرودینامیکی عددی این سیستم‌ها نسبتاً پیچیده‌تر از سیستم‌های رانش پروانه معمولی است. این موضوع سبب بکارگیری و توسعه روش‌ها و تکنیک‌های عددی در مدل‌سازی عددی پیش‌برنده‌های دریایی شده است. روش‌های توسعه یافته بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی امروزه یک ابزار مناسب برای تحلیل هیدرودینامیکی سیستم‌های رانش شناورها محسوب می‌شود. بطور کلی روش‌های بکارگرفته شده بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی به دو دسته جریان غیرویسکوز و جریان ویسکوز تقسیم‌بندی می‌شوند [۱].

روش‌های غیرویسکوز یا جریان پتانسیل مختلفی همانند روش خطوط برآ، سطوح برآ و المان مرزی برای تحلیل پروانه‌های دریایی ارائه شده است. روش‌های پتانسیل توسعه یافته بر مبنای روش پانل و سطوح برآ در عمل بسیار کاربردی و سریع برای کاربران هستند. روش‌های جریان غیرویسکوز امکان استفاده راحتی را برای طراحان با هزینه‌های محاسباتی کم ایجاد نموده‌اند. هر چند روش‌های پتانسیل اثرات ویسکوزیته را در نظر نمی‌گیرند و فرض می‌نمایند جریان غیرچرخشی است. ضعف روش‌های پتانسیل عدم پیش‌بینی صحیح نیروهای مقاومت اجزای غیر چرخشی سیستم‌های رانش است. این موضوع قابلیت‌های روش پتانسیل را در برابر مسائلی همچون پیش‌بینی مقاومت یا اندرکنش بین پروانه و اجزای غیر چرخشی محدود می‌نماید [۲]، [۳].

مبنای ایجاد روش‌های ویسکوز استفاده از حل عددی معادلات ناویر-استوکس و معادله پیوستگی است. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی همانند حل مستقیم معادلات ناویر-استوکس یا حل معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس<sup>۱</sup> یا RANS پیشنهاد شده است. این روش دقیق‌ترین و قابل انعطاف‌ترین راهکار برای تحلیل جریان‌های غیرچرخشی حول اجزای ثابت سیستم رانش و جریان‌های چرخشی حول پروانه است. هر چند روش RANS نیازمند استفاده از شبکه محاسباتی دقیق در اطراف هندسه‌های پیچیده است و زمان محاسباتی این روش نسبت به روش‌های پتانسیل بالاتر بوده و زمانبرترین و پرهزینه‌ترین روش در میان روش‌های عددی است. بخصوص در مسائل غیرمتقارن، مدل‌سازی اجزای چرخشی سیستم رانش نیازمند تحلیل‌های

غیریکنواخت بوده که سبب می‌گردد زمان حل به‌شدت افزایش یابد [۴]، [۵].

با در نظر گرفتن این موارد و با توجه به پیچیدگی‌های هندسی خاص پیش‌برنده‌های نوین، در چند سال اخیر پژوهشگران و محققان سعی نمودند با استفاده از روش‌های ترکیبی پتانسیل/ویسکوز بتوانند در جهت رفع معایب فوق و بهبود حل گام بردارند [۶]، [۷]. در شبیه‌سازی عددی پیش‌برنده‌های دریایی به کمک روش‌های ترکیبی، جریان در اطراف پروانه با روش‌های پتانسیل تحلیل می‌شود ولی جریان در اطراف اجزای غیرچرخشی با روش‌های ویسکوز شبیه‌سازی می‌گردد. از دیدگاه عملی روش ترکیبی در صورتی یک راه حل مناسب و راضی‌کننده خواهد بود که اثرات اجزای غیرچرخشی و ضرایب ویسکوز در نیروهای پروانه در نظر گرفته شود. روش ترکیبی مومنتوم المان پره و ویسکوز در گروه روش‌های ترکیبی پتانسیل/ویسکوز قرار می‌گیرد. در این روش جریان حول پروانه به وسیله روش ساده و موثر مومنتوم المان پره مدل‌سازی می‌گردد و جریان حول اجزای غیرچرخشی بوسیله روش RANS محاسبه می‌گردد. اثر پروانه نیز بوسیله نیروهای حجمی در روش ویسکوز اعمال می‌گردد. از این روش تاکنون به‌منظور تحلیل هیدرودینامیکی جریان حول بدنه و پروانه و بررسی اثر اندرکنش بین بدنه و پروانه استفاده گردیده است [۸].

هدف اصلی در این مقاله توسعه این روش ترکیبی و استفاده از آن در تحلیل هیدرودینامیکی سیستم‌های رانش پادار است. در این راستا نخست به معرفی مدل حاکم بر جریان در هریک از تئوری‌های مومنتوم المان پره و روش RANS پرداخته شده و در ادامه روش مدل‌سازی اثر پروانه و نحوه ترکیب و انتقال اطلاعات بین دو روش و الگوریتم روش ترکیبی ارائه شده است. در نهایت تحلیل عددی سیستم رانش پادار به کمک این روش ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردیده است.

## ۲ - تئوری مومنتوم المان پره

تدوین روش‌های عددی برای تحلیل عملکرد و طراحی پروانه‌ها از قرن نوزدهم شروع شده و توسعه پیدا کرده است. شاید بتوان از تئوری مومنتوم رانکین به‌عنوان پایه و اساس سایر تئوری‌ها نام برد. پس از آن تئوری‌هایی همانند تئوری المان پره فرود تکمیل‌کننده تئوری مومنتوم بوده است. تئوری‌های مومنتوم و المان پره از تئوری‌های ساده و کاربردی برای تحلیل پروانه هستند که از دقت نسبتاً خوبی برخوردار هستند. تئوری مومنتوم یک تئوری ساده برای نحوه کار پروانه براساس حرکت محوری آب که از یک دیسک پروانه عبور می‌نمایند است. در این تئوری پروانه را می‌توانیم با یک دیسک جایگزین نماییم که این به معنی آن است که پروانه دارای

مناسب جهت مدلسازی عددی این تئوری ارائه نموده‌است. مزیت این روش نسبت به دیگر روش‌های پیشرفته، هزینه محاسباتی کمتر و قابلیت محاسبه ضرایب لیفت و درگ مقاطع دوبعدی بخصوص در اعداد رینولدز پایین و در نظر گرفتن اثرات ویسکوزیته همانند پدیده استال و یا جدایی آرام جریان در اعداد رینولدز پایین است. در روش مومنتوم المان پره اثر هر یک از مقاطع پره را از تئوری المان پره با اثر تغییرات مومنتوم در سیال را از تئوری مومنتوم ترکیب می‌نماید تا یک تئوری ترکیبی را ایجاد نماید که بتواند اثر هر یک از مقاطع پره و تغییرات مومنتوم را در پایین دست جریان شبیه‌سازی نماید [۱۵].

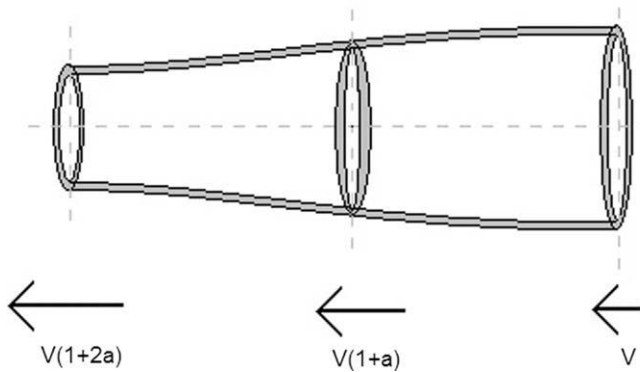
شکل ۲ جریان عبوری از یک مقطع از پره  $r$  را با ضخامت  $\delta r$  در دیسک پروانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش در سرعت محوری در دیسک پروانه نصف افزایش سرعت در پایین دست جریان است. تراست برای یک طول مشخص از پره  $dr$  را میتوان بصورت زیر نوشت [۱۰]:

$$\frac{dT}{dr} = 4\rho\pi r V^2 K a (1+a) \quad (1)$$

که  $a$  فاکتور محوری جریان و  $K$  ضریب تصحیح گلدشتاین برای پروانه با تعداد مشخص پره است. بصورت مشابه ضریب گشتاور پروانه نیز به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dQ}{dr} = 4\rho\pi r^3 \Omega K a' (1+a) \quad (2)$$

که  $a'$  فاکتور دورانی جریان و  $\Omega$  سرعت زاویه‌ای پروانه است.



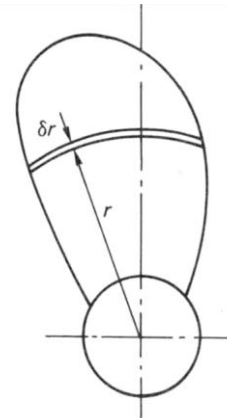
شکل ۲ - تئوری مومنتوم یا دیسک فعال [۱۰]

راندمان مقطع پره را نیز می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{V \frac{dT}{dt}}{\Omega \frac{dQ}{dr}} = \left( \frac{V}{r\Omega} \right)^2 \frac{a}{a'} \quad (3)$$

فرم بدون بعد روابط فوق عبارتند از:

تعداد نامحدود پره می‌باشد. این تئوری با خصوصیات هندسی پروانه که تراست را ایجاد می‌نماید در ارتباط نبود. تئوری المان پره که هندسه پره پروانه را در نظر می‌گیرد بر مبنای تقسیم هر پره پروانه به المان‌های نواری شکل بسیار زیاد می‌باشد. در این روش فرض گردیده است که هر پره پروانه به شعاع  $R$  از المان‌های نواری شکلی به ضخامت  $\delta r$  تشکیل شده است (شکل ۱). در واقع هر یک از این المان‌های نواری دارای یک مقطع ایرفویل ماندنی هستند که دارای ضخامت  $\delta r$  است. این ایرفویل‌ها را به علت کم بودن ضخامت می‌توان یک ایرفویل دو بعدی در نظر گرفت و سپس نیروهای لیفت و درگ را برای این مقاطع دو بعدی بدست آورد. با انتگرال گیری از این مقادیر بدست آمده برای مقاطع دوبعدی در راستای شعاع پره می‌توان نیروی لیفت و درگ کل پره را بدست آورد [۹].



شکل ۱ - تئوری المان پره [۹]

در تئوری مومنتوم المان پره از ترکیب این دو روش برای تحلیل جریان در اطراف پروانه بهره برده می‌شود. وقتی این دو روش را به صورت همزمان بکار برده شود توانایی خواهد داشت که جریان اطراف پروانه را به صورت دقیقتر از آنچه که در تئوری المان پره است، توصیف نماید. در این حالت با استفاده از روش مومنتوم می‌توان سرعت‌های القایی را نیز محاسبه نمود. در این روش پروانه به تعدادی مقطع مستقل از هم در راستای شعاع پره‌ها تقسیم می‌شود. در هر مقطع که به صورت دو بعدی در نظر گرفته می‌شود نیروهای لیفت و درگ محاسبه می‌شوند. با اعمال قوانین بقای مومنتوم خطی و زاویه‌ای به یک سری معادلات غیرخطی رسیده که می‌توان با روش تکرار آنها را برای هر مقطع پره حل نمود. در نهایت مقادیر به دست آمده با هم جمع شده، مقادیر تراست و گشتاور برای پروانه محاسبه می‌شوند [۱۰].

روش مومنتوم المان پره علاوه بر استفاده در مدلسازی پروانه‌های دریایی تاکنون کاربردهای زیاد در دیگر زمینه‌های مهندسی همانند استفاده در توربین‌های بادی [۱۱]، [۱۲] و توربین‌های جریان دریایی داشته‌است [۱۳]، [۱۴]. بنینی در سال ۲۰۰۴ یک الگوریتم

با توجه به نمودار سرعت‌ها نتیجه می‌شود که:

$$U = \frac{r\Omega(1-a')}{\cos\phi} = \pi n D x (1-a') \sec\phi \quad (13)$$

با ترکیب روابط (۸)، (۹) و (۱۳) رابطه (۱۴) بدست می‌آید:

$$\frac{dK_T}{dx} = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{N_b c}{D} \right) C_l x^2 (1-a')^2 \sec\phi (1 - \tan\phi \tan\gamma) \quad (14)$$

به صورت مشابه با ترکیب روابط (۸)، (۱۰) و (۱۳) رابطه (۱۵) بدست می‌آید:

$$\frac{dK_Q}{dx} = \frac{\pi^2}{8} \left( \frac{N_b c}{D} \right) C_l x^3 (1-a')^2 \sec\phi (\tan\phi + \tan\gamma) \quad (15)$$

معادله راندمان در تئوری مومنتوم را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\eta = \frac{V \frac{dT}{dt}}{\Omega \frac{dQ}{dr}} = \left( \frac{V}{r\Omega} \right)^2 \frac{a}{a'} = \tan^2\phi \frac{a}{a'} \quad (16)$$

راندمان ایده‌آل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_i = \frac{\tan\phi}{\tan(\phi+\gamma)} = \frac{1-a'}{1+a} \quad (17)$$

که در آن فرض گردیده  $C_d = 0$  و  $\gamma = 0$  با ترکیب روابط راندمان تئوری مومنتوم و تئوری المان پره با رابطه راندمان ایده‌آل، فاکتورهای محوری و دورانی جریان در مقطع  $dr$  پره از روابط (۱۸) و (۱۹) بدست می‌آید:

$$a' = 1 - \eta_i (1+a) \quad (18)$$

$$a = \frac{1 - \eta_i}{\eta_i + \frac{1}{\tan^2\phi}} \quad (19)$$

مقادیر فاکتورهای محوری و دورانی جریان را می‌توان با استفاده از یک الگوریتم تکرار مطابق شکل ۴ محاسبه نمود. این الگوریتم با فرض یک زاویه حمله اولیه و فرضیات  $C_d = 0$  و  $\gamma = 0$  و  $\eta = \eta_i$  قابل اجرا است.

جهت محاسبه ضرایب دوبعدی لیفت و درگ در زوایای مختلف از نرم افزار XFOIL استفاده شده است. XFOIL یک کد ترکیبی پانل خطی برمبنای فرمول‌بندی تابع جریان - ورتیسیتی برای بخش پتانسیل به‌همراه روش انتگرالی لایه مرزی برای بخش ویسکوز است که بوسیله پروفوسور درلا تهیه گردیده است. این دو بخش به صورت کوپل شده بایکدیگر حل می‌گردند به گونه‌ای که مقادیر سرعت روی مرز لایه مرزی به ازای هر یک از فرمول‌بندی‌ها مقداری یکسان شود.

$$\frac{dK_T}{dx} = \pi J^2 x K a (1+a) \quad (4)$$

$$\frac{dK_Q}{dx} = \frac{1}{2} \pi J x^3 K a' (1+a) \quad (5)$$

$$\eta = \left( \frac{J}{\pi x} \right)^2 \frac{a}{a'} \quad (6)$$

ضرایب لیفت و درگ برای یک مقطع مشخص را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{dL}{dr} = \frac{1}{2} \rho N_b c U^2 C_l(\alpha) \quad (7)$$

$$\frac{dD}{dr} = \frac{1}{2} \rho N_b c U^2 C_d(\alpha) \quad (8)$$

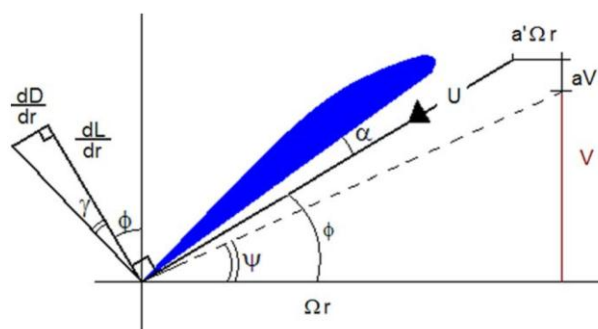
که  $N_b$  تعداد پره‌های پروانه،  $c$  طول کورد پره در مقطع موردنظر و  $C_l$  و  $C_d$  ضرایب لیفت و درگ برای مقطع دوبعدی هستند. این ضرایب وابسته به زاویه حمله مقطع بوده و می‌توان آنها را به صورت تجربی و عددی محاسبه نمود. با استفاده از نمودار سرعت در مقطع پره (شکل ۳) می‌توان تراست و گشتاور مقطع پره را به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{dL}{dr} \cos\phi - \frac{dD}{dr} \sin\phi = \frac{dL}{dr} \cos\phi (1 - \tan\phi \tan\gamma) \quad (9)$$

$$\frac{dQ}{dr} = r \left( \frac{dL}{dr} \sin\phi + \frac{dD}{dr} \cos\phi \right) = r \frac{dL}{dr} \cos\phi (\tan\phi + \tan\gamma) \quad (10)$$

که

$$\frac{dD}{dr} = \frac{dL}{dr} \tan\gamma \quad (11)$$



شکل ۳ - نمودار سرعت در تئوری المان پره [۱۰].

راندمان مقطع از ترکیب روابط فوق بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{V \frac{dT}{dt}}{\Omega \frac{dQ}{dr}} = \frac{V}{r\Omega} \frac{1 - \tan\phi \tan\gamma}{\tan\phi + \tan\gamma} = \frac{\tan\phi}{\tan(\phi+\gamma)} \quad (12)$$

که  $\vec{v}$  بردار سرعت،  $p$  فشار استاتیکی و  $\tau$  تانسور تنش است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۷]:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right] \quad (22)$$

در این رابطه،  $\mu$  ویسکوزیته و  $\vec{I}$  تانسور واحد است. با استفاده از روش متوسط‌گیری، معادلات حاکم به این فرم زیر قابل بیان خواهند بود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (23)$$

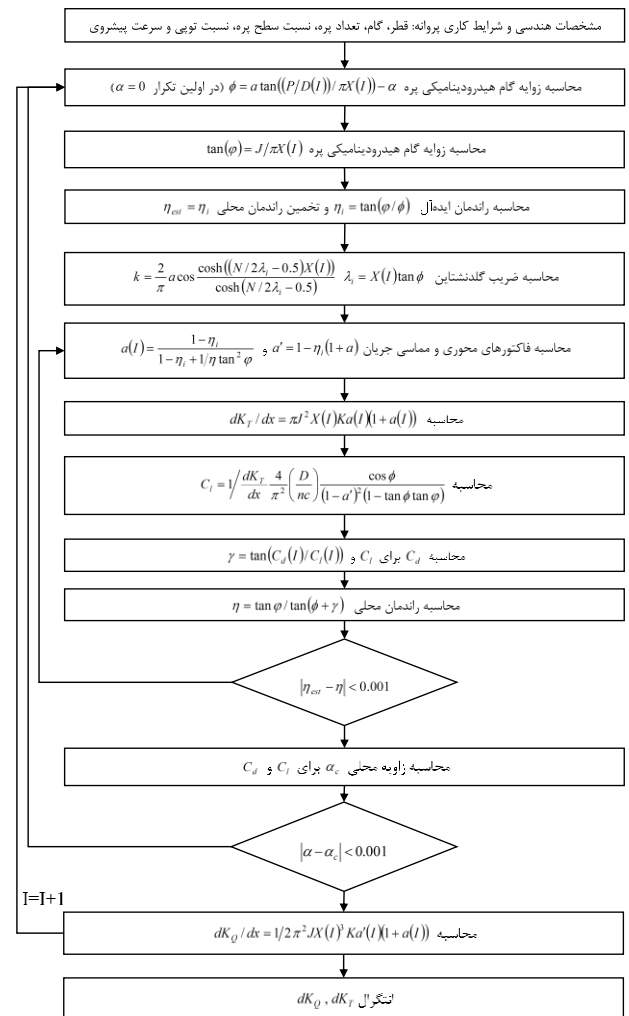
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (24)$$

که در آن  $u$  سرعت متوسط و  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  تانسور تنش رینولدز است. مدلسازی تانسور تنش، نسبتاً مشکل می‌باشد زیرا برای تعیین آن نیاز به اطلاعات دقیقی در خصوص ساختار پدیده توربولانس در سیال داریم که غالباً در دسترس نمی‌باشد. لذا برای تعیین اندازه تنشهای رینولدز باید از یکی از مدل‌های توربولانسی موجود استفاده کرد. از جمله مدل‌های معروف توربولانسی می‌توان به مدل‌های صفر معادله‌ای، یک معادله‌ای و دو معادله‌ای اشاره نمود. در مدل صفر معادله‌ای، تنها از معادلات جبری استفاده می‌شود در حالیکه در مدل‌های یک معادله‌ای و دو معادله‌ای به ترتیب از یک و دو معادله انتقال استفاده می‌گردد. انتخاب مدل توربولانسی به فیزیک جریان مسأله مورد بررسی، میزان دقت مورد نیاز، امکانات محاسباتی و میزان زمان در اختیار برای رسیدن به جواب منطقی وابسته است. از مدل‌های توربولانسی که بصورت گسترده‌ای در مدلسازی توربومشین‌ها بکار می‌روند می‌توان به مدل‌های  $k-\epsilon$  یا  $k-\omega$  اشاره کرد.

#### ۴ - روش ترکیبی RANS/BEMT

همانطور که در بخش‌های قبل بررسی شد مدلسازی کل سیستم‌های رانش با اجزای چرخشی و غیرچرخشی با روش RANS نیازمند مدلسازی دقیق میدان حل، شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های زیاد و زمان محاسباتی بالا می‌باشد. به‌منظور رفع بعضی از این مشکلات می‌توان اجزای چرخشی را با یکسری نیروهای معادل جایگزین نمود. در بیشتر روش‌های ترکیبی این نیروها با استفاده از یک حل‌گر جریان پتانسیل محاسبه می‌گردد. در حقیقت ایده اصلی استفاده از روش ترکیبی پتانسیل/ویسکوز در تحلیل

با استفاده از این کد می‌توان مقادیر ضرایب دوبعدی لیفت و درگ را در اعداد رینولدز مختلف و زوایای حمله متفاوت محاسبه نمود [۱۶]. از آنجاییکه امکان ترکیب نمودن کد XFOIL با الگوریتم BEMT وجود ندارد نخست به ازای مقاطع مختلف پره پروانه در اعداد رینولدز مختلف و زوایای حمله متفاوت می‌توان مقادیر ضرایب لیفت و درگ را محاسبه نمود. در ادامه ضرایب لیفت و درگ در هریک از مقاطع مختلف پره، با در نظر گرفتن اعداد رینولدز محلی مقطع و زاویه حمله پره با میانمایی در بین مقادیر محاسبه شده توسط XFOIL بدست می‌آید.



شکل ۴ - الگوریتم حل روش BEMT

#### ۳ - روش معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس

در روش معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس یا RANS، معادلات حاکم بر جریان برای بقای جرم و مومنتوم به ترتیب عبارتند از [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (21)$$

$$Fb_{\theta} = 0 \quad (30)$$

که  $\Delta x$  عرض بلوک پروانه،  $R_p$  شعاع پروانه و  $R_h$  شعاع توپی پروانه می‌باشد. در این روش تراست پروانه بایستی از نتایج تجربی یا دیگر روش‌های عددی محاسبه گردد. به این روش ترکیبی RANS/UT گفته می‌شود.

یک روش متداول دیگر روش توزیع تراست و گشتاور هوگ و اوردوی است [۱۹]. در این روش از توزیع شعاعی برای تراست و گشتاور پروانه که توسط هوگ و اوردوی پیشنهاد شده است استفاده می‌گردد. مبنای این متد بر اساس روش توزیع بهینه سیرکولاسیون گلدشتاین بر روی پره‌های پروانه می‌باشد که مقدار بار در ریشه و لبه پره صفر باشد. ترکیب این توزیع با روش RANS در سال ۱۹۸۸ توسط استرن پیشنهاد شده است [۲۰]. این روش ترکیبی را به اختصار روش RANS/HO می‌نامند. در این روش ترم‌های بدون بعد مومنتوم محوری  $Fb'_x$  و مماسی  $Fb'_\theta$  بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Fb'_x = A_x r^* \sqrt{1-r^*} \quad (31)$$

$$Fb'_\theta = A_\theta \frac{r^* \sqrt{1-r^*}}{(1-Y_h)r^* + Y_h} \quad (32)$$

که:

$$A_x = \frac{C_{th}}{\Delta x} \frac{105}{16(4+3Y_h)(1-Y_h)} \quad (33)$$

$$A_\theta = \frac{K_\theta}{\Delta x J^2} \frac{105}{\pi(4+3Y_h)(1-Y_h)} \quad (34)$$

$$Y_h = \frac{R_h}{R_p} \text{ و } Y = \frac{r}{R_p}, \quad r^* = \frac{(Y - Y_h)}{(1 - Y_h)}$$

می‌باشند.

ضریب بار پروانه نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_{th} = \frac{T}{1/2 \rho V_a^2 \pi R_p^2} = \frac{K_T}{\pi/8 J^2} \quad (34)$$

در این روش مشابه روش قبلی، تراست و گشتاور پروانه بایستی از نتایج تجربی یا دیگر روش‌های عددی محاسبه گردد.

در روش ترکیبی RANS/BEMT، در سرعت‌های پیش‌روی مختلف توزیع شعاعی برای ضرایب تراست و گشتاور پروانه بر اساس روش BEMT و الگوریتم معرفی شده در بخش قبلی محاسبه می‌گردد. در روش ترکیبی پتانسیل/ویسکوز، هنگامیکه از روش ویسکوز برای شبیه‌سازی جریان در اطراف اجزای غیرچرخشی استفاده می‌شود، اثر پروانه در جریان ورودی پیش‌بینی شده توسط روش ویسکوز وجود دارد. لذا باید با استفاده از روش پتانسیل

سیستم‌های رانش استفاده همزمان مزایای این دو روش است یعنی زمان حل کم و دقت مناسب روش‌های پتانسیل برای تحلیل اجزای چرخشی (پروانه) به تنهایی و دقت و توانایی روش‌های ویسکوز در تحلیل جریان در اطراف اجزای غیرچرخشی. در روش‌های ترکیبی پتانسیل/ویسکوز که از یک حل گر ویسکوز بر مبنای RANS استفاده می‌گردد اثر پروانه به وسیله یک توزیع پراکنده نیرو بیان می‌گردد که به صورت نیروهای حجمی به سمت راست معادله مومنتوم اضافه می‌گردد. نیروهای تراست و گشتاور پروانه به ترتیب بصورت توزیعی از سورس ترم‌های مومنتوم محوری و مماسی در معادلات حاکم بر جریان وارده شده و سبب شبیه‌سازی شتاب‌های محوری و دورانی ناشی از وجود پروانه می‌شوند. در این حالت معادلات حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u'_i u'_j) + F_i \quad (26)$$

که  $F_i$  ترم نیروهای حجمی است.

در حالت کلی و با یک توزیع یکنواخت مطابق روابط زیر ترم‌های مومنتوم با تقسیم تراست و گشتاور پروانه بر حجم پروانه مدلسازی می‌شوند.

$$Fb_x = \frac{T}{V} \quad (27)$$

$$Fb_\theta = \frac{Q}{rV} \quad (28)$$

که  $Fb_x$  و  $Fb_\theta$  به ترتیب ترم مومنتوم محوری و مومنتوم مماسی هستند. روابط فوق بیان کننده یک توزیع یکنواخت برای تراست و گشتاور پروانه می‌باشند. روش‌های مختلفی برای بیان توزیع ترم‌های مومنتوم اثر پروانه ارائه شده است. ساده روش، روش توزیع یکنواخت تراست است. در این روش یک توزیع یکنواخت برای تراست پروانه در نظر گرفته شده است و از اثر گشتاور پروانه صرف نظر شده است. این روش معادل تئوری مومنتوم پروانه می‌باشد. با این فرضیات، ترم مومنتوم محوری به صورت ذیل بیان می‌شود [۱۸]:

$$Fb_x = \frac{T}{\Delta x \pi (R_p^2 - R_h^2)} \quad (29)$$

در حالیکه مومنتوم مماسی از رابطه (۳۰) بدست می‌آید:

- ۷) محاسبه سرعت و یک کل محاسبه شده بوسیله روش RANS در صفحه پروانه و کم نمودن آن از سرعت‌های القایی محاسبه شده (T-I) بوسیله روش BEMT
- ۸) کنترل همگرایی با مقایسه ضرایب KT و KQ محاسبه شده با مقادیر مرحله قبلی
- ۹) جایگزین کردن (E) با (T-I) و اعمال آن به عنوان سرعت ورودی پروانه
- مراحل ۴ الی ۹ تا هنگامیکه حل همگرا شود ادامه می‌یابد.

### ۵- مدلسازی و روش عددی

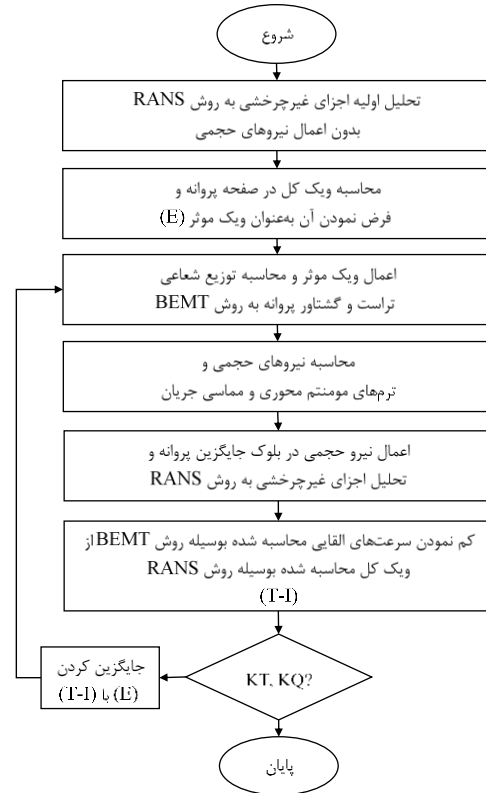
در این قسمت سعی گردیده است با استفاده از روش ترکیبی توسعه داده شده در بخش قبلی به تحلیل یک سیستم رانش پاددار پرداخته شود. سیستم پیش برنده پاددار شامل یک پروانه گام ثابت است که توان آن بوسیله یک موتور الکتریکی تامین شده و بوسیله یک شفت کوتاه منتقل می‌شود. شفت و موتور الکتریکی در داخل پوسته پاد قرار گرفته‌اند. مجموعه پاد از طریق استرات و سیستم یاتاقان به بدنه کشتی متصل می‌شود. این سیستم به مجموعه پاد قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه‌ای می‌دهد و از این طریق پروانه می‌تواند نیروی تراست را در جهت‌های مختلف ایجاد نماید [۲۱]. مدل سیستم رانش پاددار مورد بررسی مطابق سیستم رانش استفاده شده در دانشگاه مموریال توسط لیو (۲۰۰۶) و اسلام (۲۰۰۹) است [۲۲]، [۲۳]. پروانه این سیستم رانش از خانواده سری DTMB انتخاب شده که دارای مقطع NACA 66 اصلاح شده است. این پروانه، یک پروانه چهارپره‌ای بدون زوایای ریک و اسکيو است که مشخصات ابعادی این پروانه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات ابعادی پروانه

مقدار	پارامتر
۶۶	نوع مقطع پره
۴	تعداد پره‌های پروانه
۲۷۰	قطر پروانه (میلیمتر)
۰/۲۶	نسبت گام به قطر پروانه
1	نسبت توپی پروانه
۰/۱۶	نسبت سطح توسعه یافته پروانه
صفر	زاویه ریک (درجه)
صفر	زاویه اسکيو (درجه)

ابعاد پاد و استرات مورد استفاده در این مدل سیستم رانش به‌صورتی انتخاب گردیده است که متوسطی از ابعاد سیستم‌های رانش پاددار مورد استفاده در دنیا باشد. مشخصات ابعادی پاد و

سرعت‌های القایی پروانه محاسبه و از این سرعت کل کم گردد. این سرعت نهایی با عنوان ویک موثر پروانه در روش پتانسیل برای محاسبه نیروهای پروانه استفاده می‌گردد. نیروهای پروانه به صورت نیروهای حجمی در روش ویسکوز برگشت داده می‌شود. این مراحل روند کلی روش ترکیبی پتانسیل/ویسکوز است. جهت ترکیب نتایج روش BEMT با نتایج روش RANS از الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵ استفاده می‌گردد.

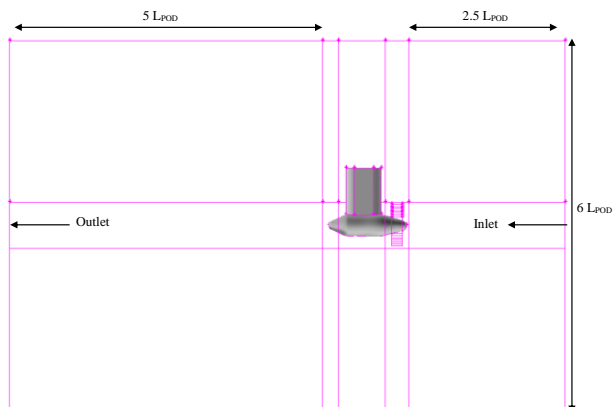


شکل ۵ - الگوریتم حل ترکیبی RANS/BEMT

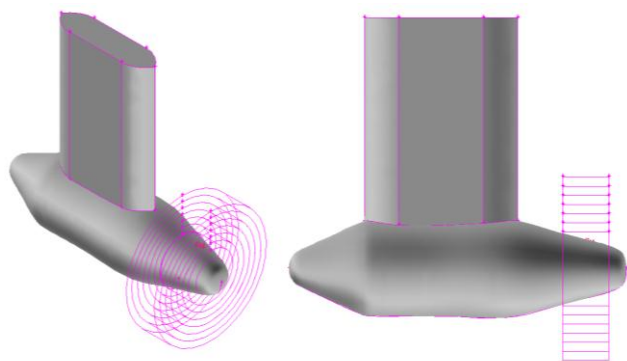
مراحل روش ترکیبی RANS/BEMT عبارتند از:

- تولید میدان حل سه بعدی در اطراف اجزای غیرچرخشی
- تحلیل جریان در اطراف اجزای غیرچرخشی به روش حجم محدود (RANS) بدون در نظر اثر پروانه (صفر قرار دادن نیروهای حجمی)
- محاسبه میدان سرعت یا ویک کل حاصله از نتایج RANS در صفحه پروانه و فرض نمودن مقدار آن به عنوان ویک موثر پروانه (E). در این حالت ویک کل برابر با ویک اسمی در میدان حل است.
- اعمال ویک موثر به عنوان سرعت ورودی در روش BEMT و محاسبه توزیع شعاعی تراست و گشتاور پروانه
- محاسبه ترم‌های مومنتم محوری و مماسی جریان
- اعمال نیرو حجمی در بلوک جایگزین پروانه و تحلیل اجزای غیرچرخشی به روش RANS

شبکه‌بندی شده‌است. به‌منظور بررسی اثر تعداد المان‌های شبکه بر جواب‌های مساله، یک تحلیل استقلال از شبکه بر روی پروانه صورت پذیرفته‌است [۵]. بر اساس نتایج این بررسی، تعداد سلول‌ها میدان در این حالت در حدود ۷۰۰ هزار عدد می‌باشد. شرایط مرزی مساله عبارتند از: شرط سرعت ورودی<sup>۲</sup> بر روی مرز ورودی میدان حل، شرط فشار خروجی<sup>۳</sup> برای مرزی خروجی میدان حل و شرط مرزی دیواره برای سطوح پاد و استرات.



شکل ۷ - مدل‌سازی میدان حل حول سیستم پاددار



شکل ۸ - جایگزینی پروانه با بلوک‌های استوانه‌ای در روش ترکیبی

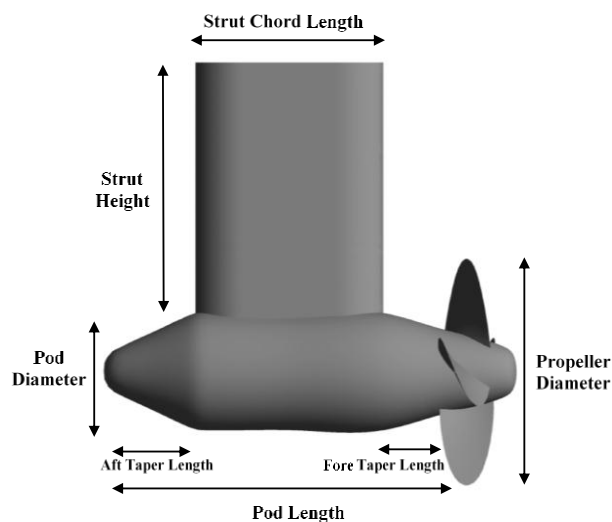
#### RANS/BEMT

جهت حل معادلات حاکم بر مسأله از نرم افزار ANSYS Fluent 14.5 که یک حل‌گر حجم محدود بر پایه معادلات RANS استفاده شده است. روش حل انتخاب شده برای حل معادلات بقای جرم و مومنتوم، روش تفکیکی می‌باشد که در آن هر یک از معادلات بصورت جداگانه حل می‌شوند. خطی‌سازی معادلات نیز به روش ضمنی انجام گرفته است. جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم در میدان حل از روش آپویند مرتبه دوم<sup>۴</sup> که از دقت مناسب برخوردار است استفاده می‌شود. میان‌یابی فشار نیز بصورت استاندارد انجام گرفته است. همچنین برای حل همزمان معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>۵</sup> استفاده می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل SST k- $\omega$  کمک گرفته شد.

استرات این مدل در جدول ۲ ارائه گردیده است. شکل ۶ نیز نمای از این مدل سیستم رانش پاددار نشان می‌دهد.

جدول ۲ - مشخصات ابعادی پاد و استرات.

پارامتر	مقدار
حداکثر قطر پاد (میلیمتر)	۱۳۹
طول پاد (میلیمتر)	۴۱۰
ارتفاع استرات (میلیمتر)	۳۰۰
طول کورد استرات (میلیمتر)	۲۲۵
عرض استرات (میلیمتر)	۶۰
فاصله صفحه پروانه تا استرات (میلیمتر)	۱۰۰
طول مخروطی ابتدایی پاد (میلیمتر)	۸۵
زاویه مخروطی ابتدایی پاد (درجه)	۱۵
طول مخروطی انتهایی پاد (میلیمتر)	۱۱۰
زاویه مخروطی انتهایی پاد (درجه)	۲۵



شکل ۶ - نمای از پاد و استرات

در تحلیل عددی این سیستم رانش پاددار، میدان بصورت نواحی استوانه‌ای شکل حول کل سیستم رانش تعریف می‌گردد. ابعاد این نواحی متناسب با طول پاد انتخاب شده‌است. طول قسمت ورودی و خروجی میدان تا بلوک پروانه به ترتیب  $2.5L_{POD}$  و  $5L_{POD}$  است. قطر استوانه نیز  $6L_{POD}$  فرض گردیده است که  $L_{POD}$  طول پاد است. شکل ۷ ابعاد میدان حل را برای این سیستم پاددار نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها میدان حل به هفده بلوک تقسیم‌بندی شده‌است. به‌منظور استفاده از روش ترکیبی، پروانه می‌بایست با یکسری از بلوک‌های استوانه‌ای در میدان حل جایگزین گردد (شکل ۸). در این تحقیق پروانه به‌صورت یک بلوک استوانه‌ای کوچکتر با قطری برابر با قطر پروانه و طول  $\Delta x = 0.25D$  مدل شده‌است.

در این محاسبات از شبکه بی‌سازمان در تمامی بلوک‌ها استفاده شده‌است. کل میدان نیز با استفاده از المان‌های چهار وجهی

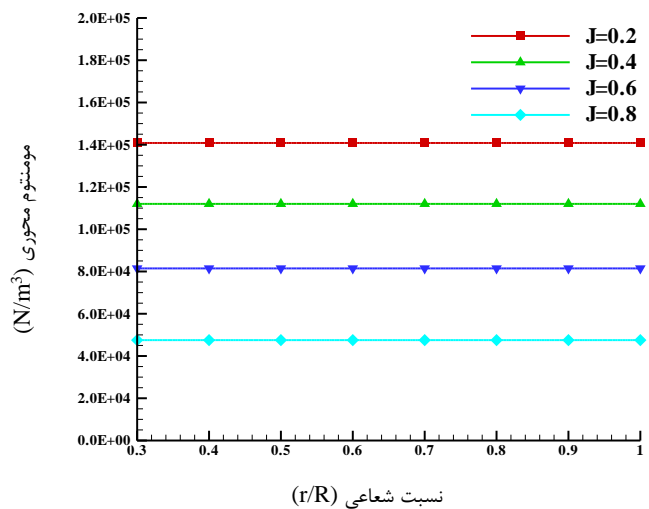
## ۶- نتایج عددی

### ۱-۶- معتبر سازی روش مدل سازی اثر پروانه

در ابتدا این تحقیق سعی گردیده روش مدل سازی اثر پروانه بصورت نیروهای حجمی در سه روش ترکیبی RANS/UT, RANS/HO, RANS/BEMT مورد بررسی قرار بگیرد و دقت نتایج بدست آمده بوسیله این روشهای ترکیبی مورد ارزیابی قرار بگیرد. همانطور که توضیح داد شد این نیروهای بصورت ترمهای اضافی مومنتوم در سمت راست معادلات RANS اضافه می شود. لذا در مرحله اول باید نیروهای پروانه را به صورت نیروهای حجمی و ترمهای مومنتوم تبدیل نمود. در ادامه این روند تبدیل نیروها برای هر روش توضیح داده شده است.

### ۱-۱-۶ روش RANS/UT

همانطور که بیان شد در این روش از یک توزیع یکنواخت برای تراست استفاده می شود. مقدار تراست پروانه در سرعت های پیشروی مختلف از نتایج تجربی استخراج شده و براساس رابطه ۲۹ مقدار ترم مومنتوم محوری محاسبه شده و به صورت یکنواخت در ناحیه دربرگیرنده پروانه در میدان حل اعمال گردیده است. سپس تحلیل مدل پاد و استرات به همراه نیروهای حجمی پروانه در سرعت های پیشروی مختلف انجام می پذیرد. در این روش مقدار ترم مومنتوم مماسی صفر فرض گردیده است. شکل ۹ مقادیر ترمهای مومنتوم محوری را که در سرعت های پیشروی مختلف محاسبه شده اند نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود این مقادیر دارای توزیع یکنواخت در راستای شعاعی پروانه می باشند.

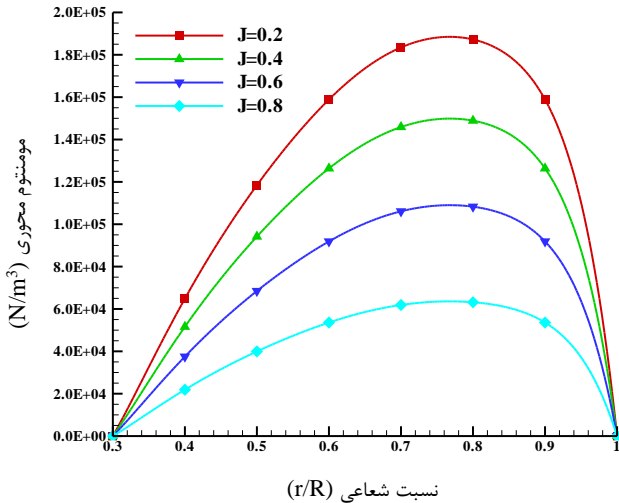


شکل ۹ - مقادیر ترمهای مومنتوم محوری یکنواخت در سرعت های پیشروی مختلف.

### ۱-۲- روش RANS/HO

در این روش از یک توزیع شعاعی برای تراست و گشتاور استفاده می شود. مقدار تراست و گشتاور پروانه در سرعت های پیشروی

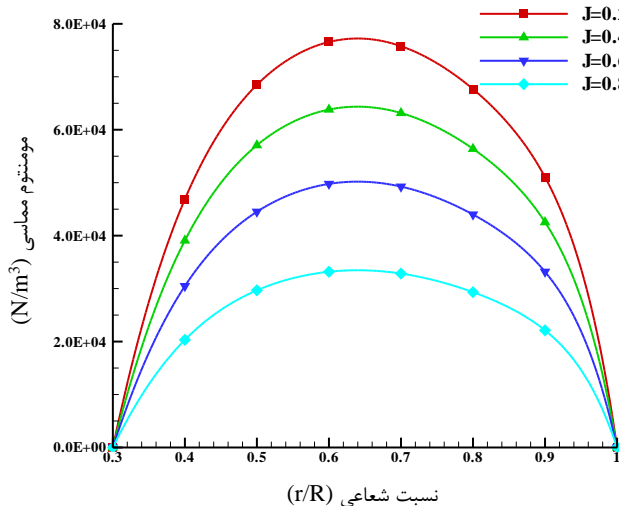
مختلف از نتایج تجربی استخراج شده و براساس روابط ۳۱ و ۳۲ مقدار ترمهای مومنتوم محوری و مماسی محاسبه شده و به صورت شعاعی در ناحیه دربرگیرنده پروانه در میدان حل اعمال گردیده است. سپس تحلیل مدل پاد و استرات به همراه نیروهای حجمی پروانه در سرعت های پیشروی مختلف انجام می پذیرد. شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب توزیع شعاعی مقادیر محاسبه شده ترمهای مومنتوم محوری و مماسی را نشان می دهند.



شکل ۱۰ - مقادیر ترمهای مومنتوم محوری به روش HO در سرعت های پیشروی مختلف.

### ۱-۳- روش RANS/BEMT

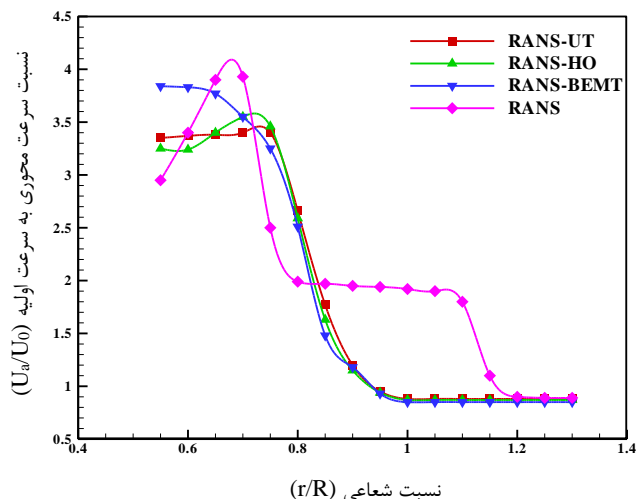
در این حالت با استفاده از روش BEMT و الگوریتم معرفی شده در شکل ۴ یک توزیع شعاعی تراست و گشتاور پروانه را در سرعت های پیشروی مختلف محاسبه شده است. سپس براساس روابط ۲۷ و ۲۸ مقادیر ترمهای مومنتوم محوری و مماسی محاسبه شده و به صورت شعاعی در ناحیه دربرگیرنده پروانه در میدان حل اعمال گردیده است. شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب توزیع شعاعی مقادیر محاسبه شده ترمهای مومنتوم محوری و مماسی را نشان می دهند.



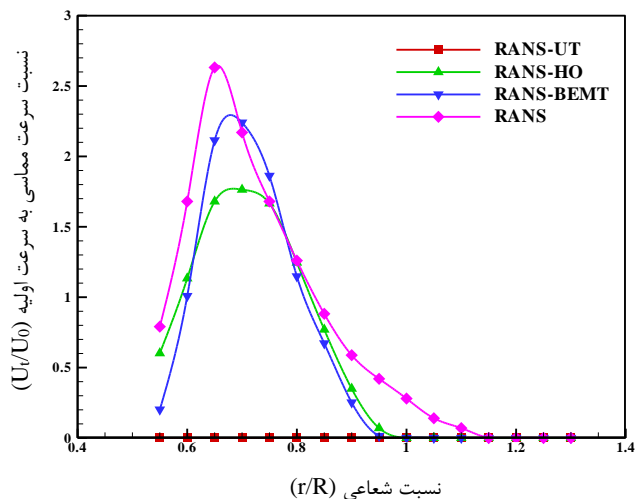
شکل ۱۱ - مقادیر ترمهای مومنتوم مماسی به روش HO

0.75R پروانه را پیش‌بینی نموده‌است. در محدوده 0.75R تا R مقدار سرعت محوری با شیب تندی کاهش و تا 0.88 سرعت ورودی کاهش یافته است. از آنجایی که در روش تراست یکنواخت ترم مومنتوم مماسی برابر صفر فرض گردیده‌است مقدار سرعت مماسی جریان نیز صفر می‌باشد. این روش وابسته به نتایج تجربی یا دیگر روش‌های عددی برای تعیین ضریب تراست پروانه است.

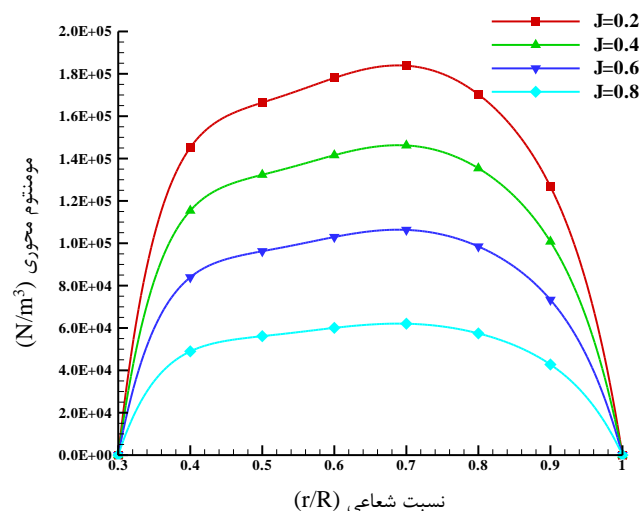
روش RANS/HO از یک توزیع شعاعی برای تراست و گشتاور پروانه بر مبنای توزیع بهینه سیرکولاسیون بر روی پره‌های پروانه استفاده می‌نماید. همانطور که مشخص است نسبت سرعت‌های محوری و مماسی در پایین دست پروانه در محدوده‌های نزدیک تویی پروانه و لبه پره دارای اختلاف با نتایج RANS است. بر اساس این نمودارها نتایج روش RANS/BEMT همخوانی بهتر با نتایج RANS دارد. از آنجایی که در این روش از یک توزیع تراست و گشتاور محلی بر مبنای مقاطع دوبعدی استفاده می‌گردد همخوانی بهتری با نتایج واقعی دارد. هرچند این روش در محدوده شعاعی 0.75R تا R دارای اختلاف با نتایج RANS است که علت آن می‌تواند عدم توانایی در مدل نمودن ورتکس لبه‌های پره باشد.



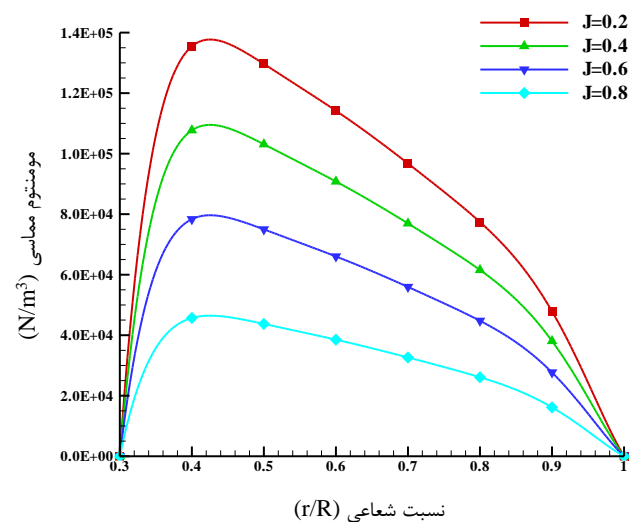
شکل ۱۴- مقایسه نسبت سرعت محوری در  $X/D=0.25$  و  $J=0.2$



شکل ۱۵- مقایسه نسبت سرعت مماسی در  $X/D=0.25$  و  $J=0.2$



شکل ۱۲- مقادیر ترم‌های مومنتوم محوری به روش BEMT



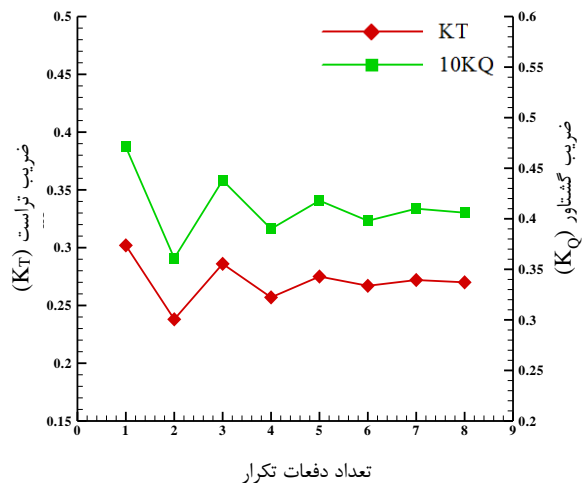
شکل ۱۳- مقادیر ترم‌های مومنتوم مماسی به روش BEMT

در ادامه با هدف بررسی دقت روش‌های ترکیبی، تحلیل هیدرودینامیکی سیستم پاددار با استفاده از این سه روش ترکیبی در سرعت پیشروی  $J=0.2$  صورت پذیرفت. در تحلیل‌ها از مدل هندسی موجود و توزیع نیروهای حجمی محاسبه شده استفاده شد. به‌منظور مقایسه نتایج از توزیع نسبت سرعت‌های محوری و مماسی در صفحه  $X/D=0.25$  در پایین دست پروانه استفاده گردیده‌است. این توزیع سرعت‌ها در راستای شعاعی پروانه به‌صورت متوسط‌گیری شده محاسبه گردیده‌اند. نتایج این سه روش ترکیبی با نتایج روش حل عددی RANS که برای این سیستم رانش انجام شده مقایسه شده‌است [۵]. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ توزیع نسبت سرعت محوری و مماسی را در صفحه  $X/D=0.25$  در پایین دست پروانه برای سیستم رانش پاددار نشان می‌دهند.

همانطور که مشاهده می‌شود روش‌های ترکیبی مختلف نتایج متفاوتی ارائه نموده‌اند. در روش ترکیبی RANS/UT، سرعت محوری ثابتی به اندازه تقریبی ۳٫۶ برابر سرعت ورودی تا محدوده

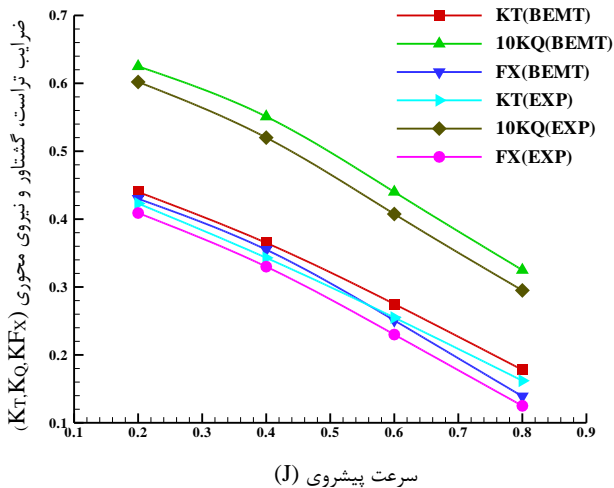
## ۲-۶- تحلیل به روش ترکیبی RANS/BEMT

در ادامه این بخش براساس روش ترکیبی RANS/BEMT تحلیل سیستم رانش پاددار صورت پذیرفته است. این شبیه‌سازی‌ها در جریان مستقیم و در محدوده سرعت‌های پیشروی ۰٫۲ تا ۰٫۸ صورت گرفته است. مطابق با الگوریتم تعریف شده در بخش‌های قبلی، توزیع ضرایب تراست و گشتاور پره برای هر یک از مقاطع پره به روش تئوری المان پره محاسبه گردیده است. سپس این توزیع به صورت نیروهای حجمی تبدیل گردیده است و به صورت ترم‌های مومنتوم محوری و مماسی جایگزین پروانه در مدل RANS شده است. این پروسه روش ترکیبی و انتقال نتایج بین دو روش RANS و روش BEMT تا هنگام همگرا شدن حل ادامه می‌یابد. شکل ۱۶ روند همگرایی حل روش ترکیبی RANS/BEMT و تعداد دفعات تکرار این روش ترکیبی و انتقال نتایج بین دو روش را برای سیستم رانش پاددار فشاری در  $J=0.6$  نشان می‌دهد. این روش مطابق الگوریتم شکل (۵) انجام پذیرفته و نتایج تا حداقل ۱٪ تغییرات در ضرایب تراست و گشتاور پروانه ادامه یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود این حل ترکیبی بعد از ۸ دفعه تکرار کوپل نتایج این دو روش همگرا شده است.



شکل ۱۶- روند همگرایی ضرایب تراست و گشتاور پاد فشاری در حل ترکیبی RANS/BEMT

شکل ۱۷ نیز مقادیر نهایی تراست و گشتاور پروانه و نیروی محوری سیستم رانش پاددار را در سرعت‌های پیشروی مختلف نشان می‌دهند که با منحنی‌های عملکردی استخراج شده به روش تجربی مقایسه شده‌اند [۲۳]. با بررسی نمودارهای عملکردی پروانه و پاد مشاهده می‌شود که دقت نسبتاً خوبی بین نتایج روش ترکیبی و نتایج تجربی برقرار است. همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده سرعت‌های پیشروی ۰٫۲ تا ۰٫۸ مقادیر تراست و گشتاور محاسبه شده به روش RANS/BEMT بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی ضرایب تراست و گشتاور و نیروی محوری در سرعت‌های پیشروی مختلف.

همچنین مقادیر خطای نسبی در سرعت‌های پیشروی مختلف محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. دقت ضرایب گشتاور پیش‌بینی شده بیشتر از دقت ضرایب تراست می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت، مقدار خطای نسبی به خصوص برای تراست افزایش یافته است. بر اساس این نتایج متوسط خطای ضرایب تراست و گشتاور پروانه در حدود ۷٪ می‌باشد. درحالی‌که این مقدار درصد خطای برای نیروهای محوری سیستم پاد تا ۱۱٪ افزایش می‌یابد. بطور کلی درصد خطای نسبی برای ضرایب نیروی محوری 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 دانست. ویسکوزیته نقش تعیین‌کننده‌ای در نیروهای محوری و جانبی ناشی از پاد و استرات ایفا می‌نماید. براساس نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده کرد که روش ترکیبی پیشنهادی به خوبی توانایی پیش‌بینی عملکرد سیستم پاددار را دارا است. این موضوع در خصوص ضرایب تراست و گشتاور پروانه مشهودتر است.

جدول ۳- درصد خطای نسبی روش ترکیبی RANS/BEMT

سرعت پیشروی	ضریب تراست	ضریب گشتاور	ضریب نیروی محوری
۰٫۲	٪ ۴٫۰۲	٪ ۳٫۸۲	٪ ۵٫۱۳
۰٫۴	٪ ۶٫۴۱	٪ ۵٫۹۶	٪ ۷٫۵۸
۰٫۶	٪ ۷٫۸۴	٪ ۷٫۹۸	٪ ۹٫۰۹
۰٫۸	٪ ۹٫۸۸	٪ ۱۰٫۱۷	٪ ۱۱٫۲۰
متوسط خطا	٪ ۷٫۰۴	٪ ۶٫۹۸	٪ ۸٫۲۵

بطور کلی دقت این روش ترکیبی که در آن پروانه صرفاً با یک تعداد نیروی حجمی جایگزین شده است نسبت به تحلیل کل

## ۷ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی گردید ضمن مروری بر مزایا و معایب روش‌های پتانسیل و ویسکوز استفاده شده در تحلیل هیدرودینامیکی پیش‌برنده‌های دریایی، یک روش عددی بر مبنای ترکیب دو روش تئوری مومنتوم المان پره و حل عددی معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس جهت شبیه‌سازی عملکرد پیش‌برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده که دارای اجزای چرخشی و غیرچرخشی در کنار یکدیگر هستند ارائه شود. در این راستا نخست روش‌های مختلف مدل‌سازی اثر پروانه در روش ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. سپس دقت روش مدل‌سازی اثر پروانه بصورت نیروهای حجمی در سه روش ترکیبی RANS/UT, RANS/HO, RANS/BEMT مورد بررسی قرار بگیرد و دقت نتایج بدست آمده بوسیله این روش‌های ترکیبی مورد ارزیابی قرار بگیرد. در ادامه این تحقیق با استفاده از تئوری مومنتوم المان پره و ترکیب آن با یک کد معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس، به تحلیل سیستم رانش پاددار به روش ترکیبی پرداخته شد و نتایج حاصله با نتایج تجربی مقایسه. با توجه نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که:

- ۱- با استفاده از روش‌های مدل‌سازی اثر پروانه در روش‌های ترکیبی نیازی به مدل‌سازی دقیق میدان حل و شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های زیاد در اطراف اجزای چرخشی نمی‌باشد. در این روش می‌توان اجزای چرخشی را با یکسری نیروهای معادل جایگزین نمود.
- ۲- روش‌های ترکیبی RANS/UT و RANS/HO وابسته به نتایج تجربی یا دیگر روش‌های عددی برای تعیین ضرایب تراست و گشتاور پروانه هستند. در این روش‌ها نسبت سرعت‌های محوری و مماسی در پایین دست پروانه در محدوده‌های نزدیک تویی پروانه و لبه پره دارای اختلاف با نتایج RANS است.
- ۳- از آنجایی که روش ترکیبی RANS/BEMT از یک توزیع تراست و گشتاور محلی بر مبنای ضرایب لیفت و درگ مقاطع دوبعدی پره استفاده می‌نماید همخوانی بهتری با نتایج واقعی برقرار است. هرچند این روش در محدوده  $0.75R$  تا  $R$  دارای اختلاف با نتایج RANS است که علت آن را می‌توان عدم توانایی در مدل نمودن ورتکس لبه‌های پره دانست.
- ۴- نتایج صحت سنجی نشان می‌دهد که روش ترکیبی مومنتوم المان پره و حل عددی معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس RANS/BEMT دارای توانایی بالایی در تحلیل‌های هیدرودینامیکی پیش‌برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده هستند.

سیستم رانش به روش RANS پایینتر می‌باشد. که علت آن عدم پیش‌بینی صحیح اندرکنش جریان بین پروانه و دیگر اجزای ثابت سیستم رانش است. برای رفع این مشکل در این روش ترکیبی سعی گردیده است با در نظر گرفتن دو سیکل انتقال سرعت ها و نیروها بین پروانه و مجموعه پاد تا حدودی اثرات پروانه و پاد بر روی یکدیگر و اندرکنش بین آنها مدل‌سازی شده و در تحلیل در نظر گرفته شده است. در مقابل به استفاده از این روش زمان محاسباتی بصورت قابل ملاحظه ای کم گردیده است و تولید شبکه در بخش RANS راحت صورت می‌پذیرد.

در انتهای این بخش زمان حل روش ترکیبی RANS/BEMT برای تحلیل سیستم رانش با کارهای عددی انجام شده برای همین مدل هندسی به روش ویسکوز با شرایط فیزیکی مشابه مقایسه گردیده که در جدول ۴ نشان داده شده است. این کارهای عددی مشابه شامل تحلیل در شرایط یکنواخت به روش RANS [۵] و تحلیل عددی در شرایط غیریکنواخت URANS [۲۴] است. زمان‌های ارائه شده شامل زمان‌های صرف شده در بخش‌های مدل‌سازی 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. همانطور که مشاهده می‌شود زمان موردنیاز برای مدل‌سازی و تولید شبکه در روش‌های RANS و URANS به ترتیب در حدود 3 و 4 برابر روش ترکیبی RANS/BEMT است. این موضوع در خصوص زمان حل مساله نیز صادق است. روش‌های RANS و URANS دارای زمان محاسباتی بیشتری نسبت به روش ترکیبی RANS/BEMT هستند. در حالیکه روش ترکیبی RANS/BEMT یک راه حل بهینه بوده که دارای دقت مناسب بوده و از زمان حل کمتری نسبت به این دو روش برخوردار است.

جدول ۴- زمان حل روش ترکیبی RANS/BEMT

روش عددی	زمان (ساعت)		
	تولید شبکه	تنظیم شرایط فیزیکی	حل مساله
RANS	۱۵	۱	۸
URANS	۲۰	۱	۵۰
RANS/BEMT	۵	۱	۳

با استفاده از روش ترکیبی RANS/BEMT در تحلیل سیستم‌های رانش پاددار به‌صورت همزمان از مزایا دو روش پتانسیل و ویسکوز استفاده شده است یعنی زمان حل کم و دقت مناسب روش پتانسیل برای تحلیل پروانه به تنهایی و دقت و توانایی روش ویسکوز در تحلیل جریان در اطراف پاد و استرات.

## ۸ - تشکر و قدردانی

این محاسبات با همکاری و پشتیبانی مرکز تحقیقات پردازش‌های فوق سریع دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفته که از آن مجموعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۹ - کلید واژگان

- 1- Reynolds-Averaged Navier Stokes method
- 2- Velocity inlet
- 3- Pressure outlet
- 4- Second order upwind
- 5- SIMPLE algorithm

## ۱۰ - مراجع

- 1- Shamsi, R., and Ghassemi, H., (2011), *Review of Numerical Methods for Hydrodynamic Analysis of Podded Propulsors*, 18<sup>th</sup> Marine Industries Conference, Kish, Iran. (In Persian)
- 2- Achkinadze, A.S., Berg, A., Krasilnikov, V.I., Stepanov, I.E., (2003), *Numerical Analysis of Podded and Steering Systems using a Velocity Based Source Boundary Element Method with Modified Trailing Edge*, In Proceeding of the Propellers/Shafting 2003 Symposium, Society of Naval Architects & Marine Engineers, Virginia Beach, VA, USA.
- 3- Shamsi, R., and Ghassemi, H., (2016), *Numerical Study of Podded Drives using Boundary Elements Method*, 3<sup>rd</sup> Applied Hydrodynamic Conference, Tehran, Iran. (In Persian)
- 4- Liu, P., Islam, M., and Veitch, B., (2009), *Unsteady Hydromechanics of a Steering Podded Propeller Unit*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 36, p. 1003–1014.
- 5- Shamsi, R., Ghassemi, H., Molyneux, D., and Liu, P., (2014), *Numerical Hydrodynamic Evaluation of Propeller (with Hub Taper) and Podded Drive in Azimuthing conditions*, Journal of Ocean Engineering, Vol.76, p. 121-135.
- 6- Kerwin, J.E., Taylor, T.E., Black, S.D., and McHugh, G.P., (1997), *A Coupled Lifting-Surface Analysis Technique for Marine Propulsors in Steady flow*, In Propellers/Shafting '97 Symposium, Society of Naval Architects & Marine Engineers, Virginia Beach, VA, USA, p. 1–15.
- 7- Warren, C.L., Taylor, T.E., and Kerwin, J.E., (2000), *A Coupled Viscous/Potential-flow Method for the Prediction of Propulsor-Induced Maneuvering Forces*, In Propellers/Shafting 2000 Symposium, The Society of Naval Architects & Marine Engineers, Virginia Beach, VA., 2000.
- 8- Laurens, J.M., (2003), *Unsteady Hydrodynamic Behaviour of a Rudder Operating in the Propeller Slipstream*, Ship Technology Research, Vol. 50, p. 141-148.
- 9- Carlton, J.S., (2007), *Marine Propeller and Propulsion*, 2<sup>nd</sup> Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann.

- 10- Phillips, A.B., Turnock, S.R., and Furlong, M., (2009), *Evaluation of Manoeuvring Coefficients of a Self-propelled Ship using a Blade Element Momentum Propeller Model Coupled to a Reynolds Averaged Navier Stokes Flow Solver*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 36(15), p. 1217-1225.
- 11- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E., (2011), *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons.
- 12- Mikkelsen, R., (2003), *Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.
- 13- Batten, W.M.J., Bahaj, A.S., Molland, A.F., and Chaplin, J.R., (2006), *Hydrodynamics of Marine Current Turbines*, Renewable Energy, Vol. 31, p. 249–256.
- 14- Nicholls-Lee, R., and Turnock, S.R., (2007), *Enhancing Performance of a Horizontal Axis Tidal Turbine using Adaptive Blades*, In Proceedings of the OCEANS 2007, Aberdeen, Scotland.
- 15- Benini, E., (2004), *Significance of Blade Element Theory in Performance Prediction of Marine Propellers*, Journal of Ocean Engineering, Vol. 31, p. 957–974.
- 16- Drela, M., (1989), *XFOIL: an Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*, In Conference on low Reynolds number airfoil aerodynamics, University of Notre Dame, 1989.
- 17- Wilcox, David C., (1998), *Turbulence modeling for CFD*, 2<sup>nd</sup> edition, La Canada, CA: DCW industries.
- 18- Phillips, A.B., Turnock, S.R., and Furlong, M.E., (2010), *Accurate Capture of Rudder-Propeller Interaction using a Coupled Blade Element Momentum-RANS Approach*, Ship Technology Research (Schiffstechnik), Vol. 57(2), p. 128-139.
- 19- Hough, G.R., and Ordway D.E., (1964), *The Generalized Actuator Disk*, Report No. TAR-TR-6401, Therm Advanced Research Inc. ITHACA NY.
- 20- Stern, F., H.T. Kim, V. C. Patel., and H. C. Chen., (1998), *A Viscous-Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction*, Journal of Ship Research, Vol. 32(4), p. 246-262.
- 21- Vartdal, L., Bloch, F., (2001), *Ferrycat 120 Propulsion Aspects and Manoeuvring Capabilities*, In Proceedings of First International Conference on Double-ended Ferries, Molde, Norway.
- 22- Liu, P., (2006), *The Design of a Podded Propeller Base Model Geometry and Prediction of Its Hydrodynamics*, Report TR-2006-16, Institute for Ocean Technology, National Research Council, Canada.
- 23- Islam, M.F., Veitch, B., Akinturk, A., Bose, N., and Liu, P., (2009), *Performance Study of Podded Propulsor in Static Azimuthing Conditions*,

International Shipbuilding Progress, Vol. 56(3), p. 135–157.

24- Shamsi, R., Ghassemi, H., (2015), *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.