

# تحلیل عددی عملکرد هیدرودینامیکی و جریان عبوری از پروانه معکوس‌گرد

حسن قاسمی<sup>۱\*</sup>، محمد حسن مقدس<sup>۲</sup>، محسن طاهری نسب<sup>۳</sup>

## چکیده

تاکنون روش‌های محاسباتی مختلفی برای تحلیل پروانه‌های دریایی به کار گرفته شده‌اند. در این مقاله، روش المان مرزی برای تحلیل عددی عملکرد هیدرودینامیکی دائم پروانه معکوس‌گرد توسعه داده شده است. جریان پتانسیل اطراف پروانه جلو و پروانه عقب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، با محاسبه توزیع جریان گردابی القایی، برهمکنش میان پروانه‌های جلو و عقب (پروانه معکوس‌گرد) به‌کار گرفته شد. نتایج شامل ضرایب عملکرد هیدرودینامیکی، نیروها و گشتاور کلی پروانه معکوس‌گرد، توزیع جریان گردشی، مقایسه گردابه القایی در فاصله بین دو پروانه و گردابه القایی در پایین پروانه عقب است. نتایج عددی نشان می‌دهد که پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیکی، برابری خوبی با نتایج تجربی دارد.

کلمات کلیدی: پروانه معکوس‌گرد، روش المان مرزی، توزیع گردابه القایی، عملکرد هیدرودینامیکی دائم

## Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance and Flow around Contra-Rotating Propellers

H. Ghassemi, M. H. Moghaddas and M. Taherinasab

### ABSTRACT

Computational hydrodynamics method was formulated and implemented for marine propellers. In this paper, a design methodology for predicting steady hydrodynamic performance of contra rotating propeller (CRP) has been developed based on boundary element method. The potential flow around fore propeller and aft propeller has been analyzed. In addition, with computation of induced wake distribution, interaction between fore and aft propellers are contemplated. This method for a typical contra-rotating propeller is applied. The results include hydrodynamic performance coefficients, overall force and torque on the CRP, circulation distributions and comparison of induced wake at position of distance between two propellers and induced wake at position of downstream of aft propeller. Numerical results show that the hydrodynamic performance predictions agree well with the experiment data.

**KEYWORDS:** Contra-rotating propeller, boundary element method, induced wake distribution, steady hydrodynamic performance

سرعت درکشتهای جابجایی<sup>۱</sup> و یا در وسایل زیرآبی (مانند

### ۱- مقدمه

با گسترش تقاضا برای افزایش حمل کالا و سرعت سامانه اژدرها) مورد توجه محققان قرار گرفته است.

پروانه‌های معکوس‌گرد از دو پروانه تشکیل شده‌اند که بر روی یک محور هم‌راستا نصب شده‌اند و در خلاف جهت یکی‌گر دوران می‌نمایند. با وجود معایبی مانند پیچیدگی رانشی که بتواند این نیاز را تامین نماید، معطوف نمودند. امروزه استفاده از پروانه‌های معکوس‌گرد برای افزایش

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۸

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۳/۱۶

۱ \* نویسنده مسئول و دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی دریا؛ gasemi@aut.ac.ir

۲ استادیار، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

۳ کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، دانشکده مهندسی دریایی

طراحی هیدرودینامیکی و هندسی و وزن بیشتر در نتیجه به کار بردن موتور مورد نیاز پروانه، پروانه‌های معکوس‌گرد در



گردابی، تشریح نموده است. در مقاله حاضر، از روش وی با اعمال تغییراتی بر مبنای روش المان مرزی، استفاده شده است [۸].

در زمینه تحقیقات تجربی، نتایج مربوط به تست تجربی تعدادی پروانه معکوس‌گرد، توسط هکر انتشار یافته است. در این مقاله هکر علاوه بر محاسبه عملکرد هر یک از پروانه‌ها به بررسی تجربی اثر برخی پارامترها مانند قطر پروانه جلو، فاصله بین دو پروانه و گام پروانه‌ها پرداخته است [۹]. همچنین ون‌مانن و استرولد آزمایش‌های تجربی را روی یک سری سیستماتیک از پروانه‌های معکوس‌گرد که پروانه جلوی آنها چهار پرهای و پروانه عقبی پنج پرهای است، انجام داده است [۱۰].

نتایج آزمایش چند نمونه پروانه معکوس‌گرد نیز توسط میلر منتشر شده است. که در آن نیروهای واردہ بر پروانه معکوس‌گرد در حالت ناپایدار برای جریان یکنواخت و غیریکنواخت محاسبه شده است [۱۱].

پروانه معکوس‌گرد در سرعت دورانی بالا که بیشتر برای اژدرها بکار می‌رود، تحلیل و محاسبات اینگونه پروانه‌ها مشکل است و هنوز کارهای تحقیقاتی با استفاده از روش المان مرزی انجام نشده است. در اینجا سعی کردیم با استفاده از روش‌های عددی، روش المان مرزی و شرایط فیزیکی مسئله نتایج خوبی بدست آید. این نتایج شامل توزیع فشار روی پره ها، عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های جلویی و عقبی و عکس العمل این دو پروانه است. محاسبه سرعت القایی ناشی از پروانه جلویی که بعنوان جریان ورودی به پروانه عقبی است و عکس العمل این دو پروانه از مسایل مهم بشمار می‌رود که در این مقاله به آن اشاره شده است.

## ۲- معادلات بنیادی

### ۲-۱- سامانه مختصات

فرض شود پروانه جلو با سرعت زاویه‌ای  $\omega_r$  در جهت پاد ساعتگرد و پروانه عقب با سرعت زاویه‌ای  $\omega_a$  در جهت ساعتگرد در سیال غیرویسکوز، تراکمندپذیر و جریان غیرچرخشی، دوران می‌نماید. جریان یکنواخت  $V_A$  در راستای محوری از بالادست به پروانه جلو برخورد می‌نماید.

سامانه مختصات کلی  $O-XYZ$  را، که  $O$  در مرکز پروانه قرار گرفته است، به گونه‌ای تعریف می‌نماییم که  $X$  در راستای محور پروانه و در جهت پایین باشد. محور  $Z$  منطبق بر خط مولد پره اصلی<sup>۳</sup> است و محور  $Y$  نیز سامانه مختصات راستگرد را کامل می‌نماید. سامانه مختصات محلی  $O-xyz$

مقایسه با پروانه‌های تکی دارای مزایای بسیاری هستند. که از آن جمله:

الف- به طور کلی، انرژی دورانی ایجاد شده توسط پروانه، نه تنها نقشی در تولید تراست ندارد، بلکه موجب اتلاف انرژی نیز می‌شود. مهم ترین مزیت پروانه‌های معکوس‌گرد، بهبود راندمان در اثر بازیافت انرژی به وسیله پروانه عقبی است. در حقیقت، پروانه عقب بخشی از انرژی دورانی داده شده به آب توسط پروانه جلو را نخیره می‌نماید. بنابراین، استفاده از این پروانه‌ها در کاهش سوخت مصرفی اثر زیادی خواهد داشت.

ب- توانایی ایجاد تعادل در گشتاور بین پروانه‌ها را دارد. از این رو، برای حذف گشتاور معکوس در وسایلی که حفظ پایداری در آنها اهمیت دارد، استفاده می‌شود.

ج- توزیع بار کمتری روی پره‌ها وجود داشته، در نتیجه وقوع حبابها در این پروانه‌ها به تاخیر خواهد افتاد. همچنین توزیع بار کمتر، این امکان را می‌دهد که این پروانه‌ها با قطر مشابه، توان بیشتری تولید نمایند.

د- از آنجا که در پایین پروانه معکوس‌گرد، میدان گردابی یکنواخت‌تری وجود دارد، صدای کمتری توسط پروانه معکوس‌گرد ایجاد می‌شود.

در زمینه بررسی چگونگی عملکرد و عوامل موثر بر عملکرد پروانه‌های معکوس‌گرد کارهای محدودی توسط محققین به صورت تجربی و یا عددی به چاپ رسیده است. کاکس و رید [۱]، تسکوناس [۲] با استفاده از تئوری سطوح بالابر به محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پروانه معکوس‌گرد پرداخته است. همچنین یانگ و همکارانش [۳-۴] با بکارگیری همین تئوری اثرات متقابل گردابه‌های دنباله‌ای دو پروانه در حالت پایدار و ناپایدار بکار گرفته است. هوشینو نیز تحلیل نیروهای وارد برمحور پروانه‌های معکوس‌گرد پرداخته و نتایج بدست آمده را با اطلاعات تجربی که توسط خود او انجام شده است، مقایسه نموده است [۵]. در تحقیق دیگری گو و کیناس با بکارگیری همزمان روش شبکه گردابی و روش حجم محدود برای پروانه‌های معکوس‌گرد و پروانه‌های داکتدار، بر مبنای حل اویلر برای کل میدان جریان، به محاسبه برهمکنش بین دو پروانه در پروانه‌های معکوس‌گرد، و یا برهمکنش بین پروانه و داکت در پروانه‌های داکتدار پرداخته‌اند [۶].

قاسمی نیز در تحقیقی به طراحی پروانه معکوس‌گرد برای دو نمونه شناور پرداخته است. در این تحقیق، همچنین مقایسه-ای میان عملکرد پروانه معکوس‌گرد و پروانه تکی، برای دو شناور مورد نظر انجام شده است [۷]. کرونویز در تحقیق خود چگونگی به کارگیری کدهای رایانه ای را بر مبنای تئوری شبکه



$$\begin{cases} x_p = -[r \tan(\theta_R) + r \theta_s \tan(\beta_G)] + (0.5 - x_c) \sin(\beta_G) + \\ y_{u,L} \cos(\beta_G) \\ y_p = r \sin\left[\beta_G + \frac{180[(0.5 - x_c) \cos(\beta_G) - y_{u,L} \cos(\beta_G)]}{\pi r}\right] \\ z_p = r \cos\left[\beta_G + \frac{180[(0.5 - x_c) \cos(\beta_G) - y_{u,L} \cos(\beta_G)]}{\pi r}\right] \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $\beta_G$  زاویه گام هندسی،  $\theta_R$  زاویه ریک، و  $\theta_s$  زاویه اسکو،  $y_{u,L}$  مختصات عرضی هر نقطه روی سطح بالایی و پایین فویل،  $x_c$  مختصات طولی هر نقطه روی سطح فویل،  $r$  شعاع هر مقطع است.

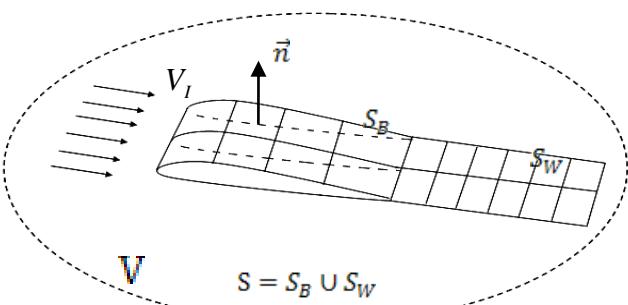
برای تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی، به عبارت دیگر، برای بدست آوردن مختصات نقاط سایر پرهها از نگاشت (۴) استفاده می‌نماییم که  $\varphi$  زاویه فاز هر پره است (شکل ۱).

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

### ۳-۲- سطح هندسی دنباله

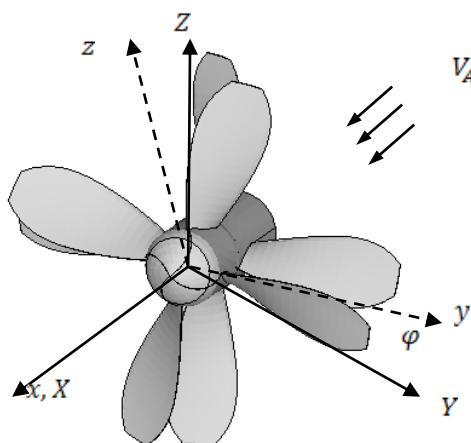
فرض شود سطح دنباله  $S_W$  بسیار نازک است و هیچ‌گونه پرشی در جریان و فشار روی سطح دنباله وجود نداشته، ولی پرش در مقادیر پتانسیل می‌تواند وجود داشته باشد. سطوح مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. در تحلیل هیدرودینامیکی برای اراضی شرط کوتا، لازم است هندسه سطح دنباله مشخص شود [۱۲].

همان طور که بیان شد، برای سادگی فرایند تحلیل، ضخامتی برای سطح دنباله در نظر گرفته نمی‌شود. اما از آنجا که لبه انتهایی هر مقطع دارای ضخامت است، برای تعیین مختصات نقاط دنباله در روی لبه انتهایی پره، از میانگین مختصات سطوح بالا و پایین پره استفاده می‌شود. کل میزان پیشروی گردابه در راستای محور پروانه برابر با پیشروی پروانه پس از دو چرخش کامل است. از نظر تجربی، این میزان پیشروی برای اراضی شرط کوتا کافی است [۱۲].



شکل (۲): جسم در مقابل جریان

نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): سامانه مختصات پروانه معکوس-گرد

برای مختصات استوانه‌ای، مختصات زاویه‌ای  $\theta$  در جهت ساعتگرد از محور  $Z$  اندازه‌گیری می‌شود. مختصات  $r$  از محور اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، سامانه مختصات دکارتی با استفاده از روابط زیر به سامانه مختصات استوانه‌ای منتقل داده می‌شود.

$$\begin{cases} x = x \\ y = -rz \\ z = +rc \end{cases} \quad (1)$$

که در آن

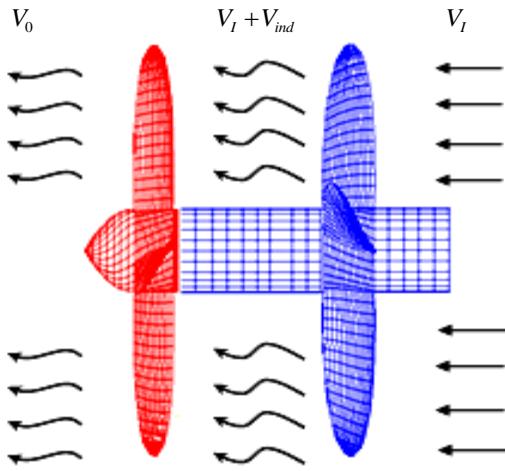
$$\begin{cases} r = \sqrt{y^2 + z^2} \\ \theta = \tan^{-1}(-y/z) \end{cases} \quad (2)$$

### ۲-۲- هندسه پروانه

برای تولید هندسه پروانه، ابتدا هندسه پره اصلی پروانه عقب در مختصات دکارتی تشكیل می‌شود، سپس این مختصات به مختصات استوانه‌ای نگاشته می‌شود. در مرحله بعد با توجه مشخص بودن مختصات استوانه‌ای پره اصلی پروانه عقب، مختصات استوانه‌ای و دکارتی سایر پرهها بدست می‌آید. در مورد تشكیل هندسه پروانه جلو نیز همین فرآیند تکرار می‌شود. سپس با توجه به فاصله بین دو پروانه، مختصات پروانه جلو، در راستای محوری منتقل داده می‌شود.

بطورمعمول، مقاطع پره در شعاع‌های مختلف در مختصات دو بعدی (شبیه مقطع فویل) مشخص است. با تعریف هندسه مقاطع پایه، این امکان فراهم می‌شود که مختصات هر نقطه  $P$  روی سطح پره اصلی، مشخص شود. برای پروانه از رابطه (۳) می‌توان استفاده نمود [۱۲].

## ۴-۲- جریان پتانسیل و حل معادله حاکم



شکل (۳): جریان عبوری از پروانه معکوس-گرد

$S_B$  شامل سطح پروانه جلو  $S_{Bf}$  و سطح پروانه عقب  $S_{Ba}$  است.  $S_W$  شامل سطح دنباله پروانه جلو  $S_{Wf}$  و سطح دنباله پروانه عقب  $S_{Wa}$  است شکل (۴). فرم ماتریسی معادله (۹) به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$[D][\phi] = [S][\phi_n] + [W][\Delta\phi] \quad (10)$$

که  $\phi_n$  با توجه به شرط مرزی سینماتیک بدست آمد.  $\phi$  پتانسیل اغتشاشی مجهول و  $\Delta\phi$  پرش پتانسیلی مجهول در لبه انتهایی پره است. ماتریس‌های  $[D]$ ,  $[S]$  و  $[W]$  شامل ضرایب اثر هستند که از این ضرایب از روش عددی و تحلیلی محاسبه می‌شوند [۱۴]. درایه‌های این ماتریس‌ها به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} S_{ij} = \sum_{k=1}^K \left[ \iint_{S_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ijk}} \right) ds_j \right] \\ D_{ij} = \sum_{k=1}^K \left[ \iint_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ijk}} \right) ds_j \right] \\ W_{ij} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left[ \iint_{S_w} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ilk}} \right) ds_l \right] \end{cases} \quad (11)$$

که  $r_{ijk}$  و  $r_{ilk}$  فاصله از نقطه کنترلی المان  $k$  ام پره، تا نقطه انتگرالی روی  $S_j$  و  $S_w$  است.

با توجه به فرضیات بیان شده در بخش ۱-۲، پتانسیل اغتشاشی<sup>۷</sup> معادله لاپلاس را ارضامی نماید. ناحیه بسته  $V$  با مرز  $S$  را در نظر بگیرید (شکل ۲). مساله مقدار مرزی، برای معادله پتانسیل، به صورت مساله نیومن، می‌تواند به صورت رابطه (۵) بیان شود.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 & \text{in } V \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = \phi_n & \text{on } S \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $n$  بردار عمود بر سطح است. حل باید شرط مرزی مساله روی مرز  $S_B$  را ارضامی نماید. شرط مرزی سینماتیکی که باید روی مرز  $S_B$  ارضام شود، به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -V_I \cdot n \quad (6)$$

که در آن

$$V_I = V_A + \omega \times r + V_{ind} \quad (7)$$

در اینجا،  $\omega$  سرعت دورانی پروانه،  $V_A$  سرعت پیشروی و  $V_{ind}$  سرعت القایی هر کدام از پروانه‌های جلو و عقب از دیگری است (شکل ۳).

ارضای شرط کوتا در لبه انتهایی پره برای تعیین گردش جریان باید مورد توجه قرار گیرد. در بیشتر موارد شرط کوتا به این صورت بیان می‌شود که سرعت جریان در لبه انتهایی باید دارای مقدار محدودی باشد. به عبارت دیگر:

$$|\nabla \phi|_{T.E.} < \infty \quad (8)$$

مساله پتانسیل با در نظر گرفتن سطح پروانه‌های جلو و عقب و بکارگیری قضیه گرین، برای یک نقطه میدانی  $P$  روی سطح پروانه‌های جلو و عقب  $S_B$ ، به صورت رابطه (۹) تبدیل خواهد شد:

$$2\pi\phi(P) = \iint_{S_B} \left[ \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} - (V_I \cdot n_q) \frac{1}{R(p,q)} \right] dS + \iint_{S_w} \Delta\phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} dS \quad (9)$$

پروانه معکوس‌گرد محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} K_T &= K_{Tf} + K_{Ta} \\ K_Q &= K_{Qf} + K_{Qa} \\ \eta &= \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi} \end{aligned} \quad (15)$$

### ۳- نتایج تحلیل عددی

#### ۱-۳- عملکرد هیدرودینامیکی

در این بخش، نتایج تحلیل یک نمونه پروانه معکوس‌گرد ارائه شده است. پروانه معکوس‌گرد متشکل از دو پروانه به نامهای 3686F-3687A است. پروانه جلو 3686F چپگرد و پروانه عقب 3687A راستگرد است. مشخصات هندسی این پروانه‌ها در مرجع [۱۱] ارائه شده است. خلاصه‌ای از مشخصات هندسی این پروانه‌ها در جداول (۱) و (۲) بیان شده است.

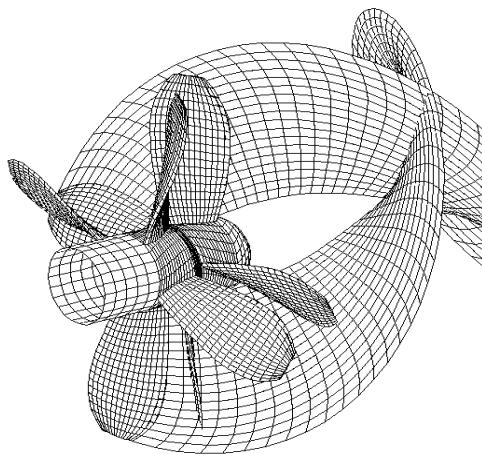
نمایی از هندسه این پروانه معکوس‌گرد نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. سطوح دنبله در دو چرخش دوران در شکل (۶) نشان داده است. پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A در ضرایب پیشروی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تست تجربی پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A 3686F توسط میلار ارائه شده است [۱۱]. در تحقیق حاضر، از نتایج تجربی میلار برای اعتبارسنجی نتایج عددی استفاده شده است.

جدول (۱): مشخصات هندسه پروانه 3686F

جلویی	موقعیت
۴	تعداد پره‌ها
۰/۳۰۵۲	قطر (متر)
۰/۳۰۴۹	گام در شعاع $/VR$ (متر)
۰/۳۰۳	نسبت سطح گسترش یافته
چپ گرد	جهت دوران
NACA 66 a=۰/۸	نوع مقطع پره

جدول (۲): مشخصات هندسه پروانه 3687A

عقبی	موقعیت
۴	تعداد پره‌ها
۰/۲۹۹۱	قطر (متر)
۰/۲۹۶۸	گام در شعاع $/VR$ (متر)
۰/۳۲۴	نسبت سطح گسترش یافته
راست گرد	جهت دوران
NACA 66 a=۰/۸	نوع مقطع پره



شکل (۴): سطوح المان برای پروانه و دنبله برای حل

#### ۵-۲-۴- ضرایب هیدرودینامیکی

بعد از حل معادله (۱۵)، و بدست آوردن مقادیر مجهول پتانسیل، توزیع سرعت و فشار روی پروانه‌های جلو و عقب محاسبه می‌شود. با داشتن توزیع فشار نیروها و گشتاورها، ضرایب هیدرودینامیکی شامل ضریب تراست و ضریب گشتاور و راندمان هر کدام از پروانه‌ها تعیین می‌شود. ضریب پیشروی هر دو پروانه جلو عقب برابر ضریب پیشروی پروانه جلو در نظر گرفته می‌شود. برای پروانه جلو داریم:

$$\begin{aligned} K_{Tf} &= \frac{T_f}{\rho \omega_f^2 D_f^4}, & K_{Qf} &= \frac{Q_f}{\rho \omega_f^3 D_f^5} \\ \eta &= \frac{K_{Tf}}{K_{Qf}} \frac{J}{2\pi}, & J &= \frac{V_A}{\omega_f D_f} \end{aligned} \quad (12)$$

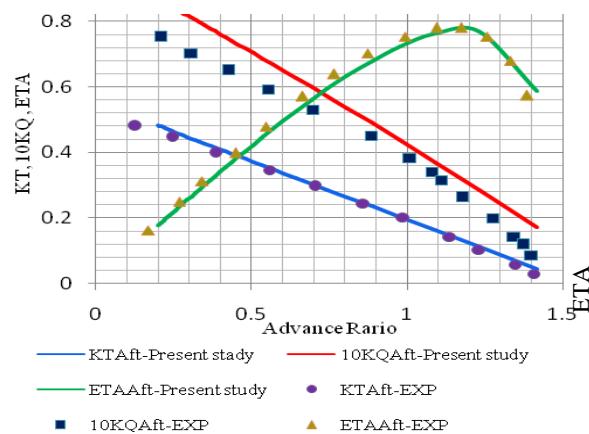
که  $\omega_f$  سرعت دورانی پروانه جلو،  $D_f$  قطر پروانه جلو،  $T_f$  و  $Q_f$  تراست و گشتاور تولیده شده توسط پروانه جلو است. برای پروانه عقب نیز داریم:

$$\begin{aligned} K_{Ta} &= \frac{T_a}{\rho \omega_a^2 D_a^4}, & K_{Qa} &= \frac{Q_a}{\rho \omega_a^3 D_a^5} \\ \eta &= \frac{K_{Ta}}{K_{Qa}} \frac{J}{2\pi}, & J &= \frac{V_A}{\omega_a D_a} \end{aligned} \quad (13)$$

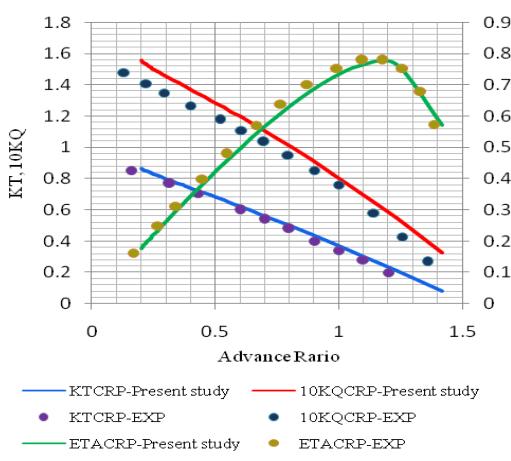
که  $\omega_a$  سرعت دورانی پروانه عقب،  $D_a$  قطر پروانه عقب،  $T_a$  و  $Q_a$  تراست و گشتاور تولیده شده توسط پروانه عقب است. تراست کل و گشتاور کل پروانه معکوس‌گرد نیز به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} T &= |T_f| + |T_a| \\ Q &= |Q_f| - |Q_a| \end{aligned} \quad (14)$$

در پایان، با مشخص بودن تراست و گشتاور پروانه جلو و عقب و ضرایب عملکردی هر کدام از پروانه‌ها، عوامل عملکردی

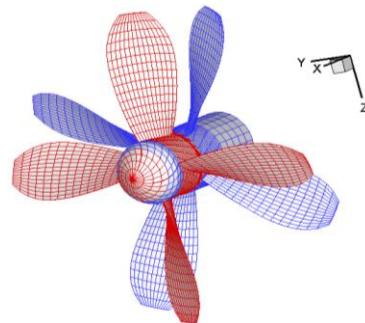


شکل (۸): عوامل عملکرد هیدرودینامیکی پروانه عقب

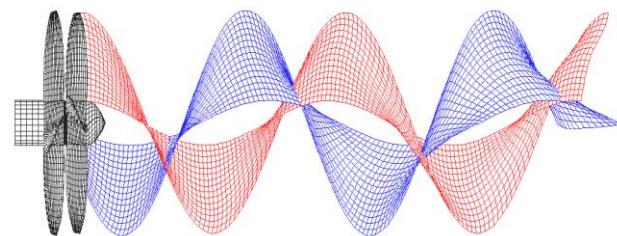


شکل (۹): عملکرد هیدرودینامیکی پروانه عقب 3686F-3687A

منحنی‌های عملکرد هیدرودینامیکی پروانه جلو 3686F در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های عملکرد هیدرودینامیکی پروانه عقب 3687A در شکل (۸) ارائه شده است. منحنی‌های عملکرد هیدرودینامیکی پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A نیز در شکل (۹) ارائه شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.



شکل (۵): پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A



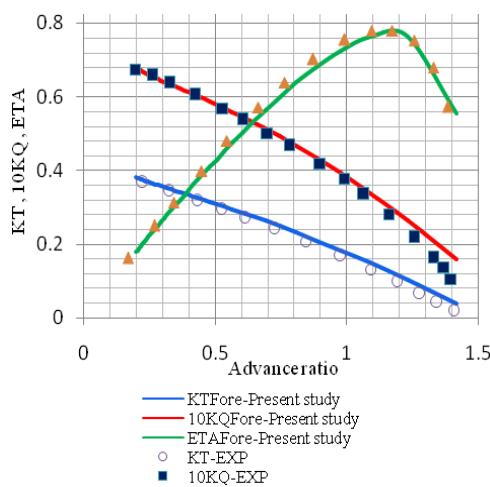
شکل (۶): سطوح دنباله در دو چرخش دوران پروانه معکوس‌گرد

### ۲-۳- تحلیل خطای

درصد خطای نسبی نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی، در مورد عوامل عملکردی هر یک از پروانه‌های جلو و عقب، و نتایج کل در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. خطاهای دیده شده ناشی از عوامل زیر است:

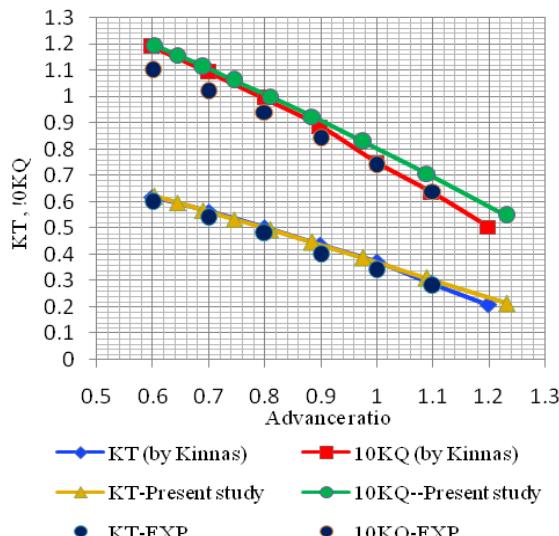
- وجود خطای در طراحی هندسه؛ در تحقیق حاضر سعی شده است بیشترین دقیقت در تولید هندسه پروانه طبق مشخصات هندسی داده شده، به کار برده شود. به هر حال وجود مقداری اختلاف بین نمونه شبیه‌سازی شده و نمونه واقعی وجود دارد.

- خطای ذاتی ناشی از روش‌های عددی؛ این خطای در محاسبه انتگرال‌های عددی ضرایب اثر، محاسبه مشتقات عددی از پتانسیل، گسته‌سازی معادلات انتگرالی و سایر محاسبات عددی است.

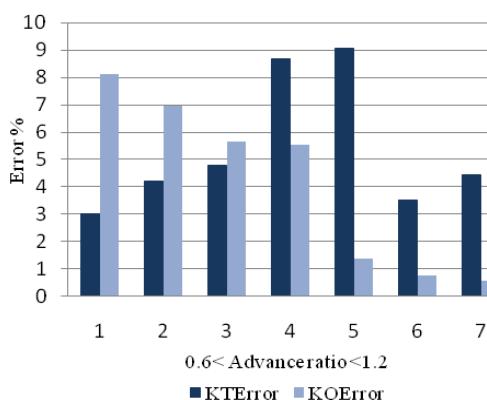


شکل (۷): عوامل عملکرد هیدرودینامیکی پروانه جلو

کیناس در سال ۲۰۰۳ با بکارگیری همزمان روش شبکه گردابی و روش حجم محدود مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [۴]. در شکل (۱۲) مقایسه میان نتایج تحقیق حاضر و تحقیق کیناس نشان داده شده است. درصد خطای نتایج تحقیق کیناس با نتایج تجربی، در مورد عوامل عملکردی پروانه معکوس‌گرد ۳۶۸۶F-۳۶۸۷A در شکل (۱۴) ارائه شده است. بنابراین، می‌توان نتایج تحقیق حاضر را با دقت مناسبی قابل قبول دانست.



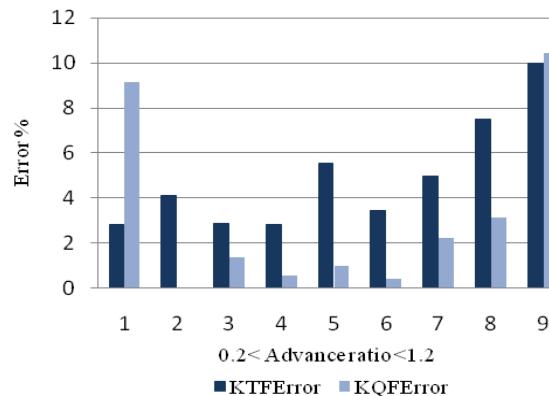
شکل (۱۳): مقایسه نتایج روش حاضر و روش عددی مشابه و نتایج تجربی



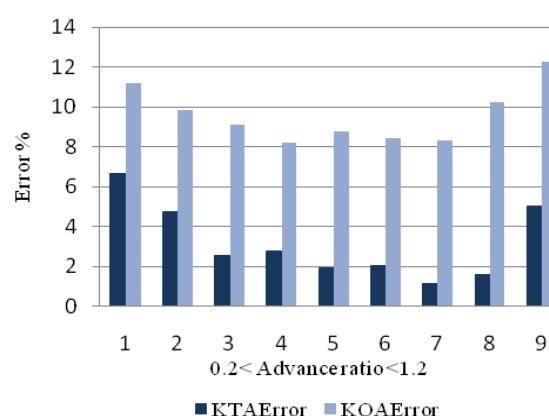
شکل (۱۴): درصد خطای نتایج عددی مشابه با نتایج تجربی

**۳-۳- توزیع جریان گردشی، تراست و گشتاور**  
توزیع شعاعی جریان گردشی نیز برای هر کدام از پروانه‌های جلو و عقب مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱۵) توزیع جریان گردشی پروانه‌ها در ضریب پیشروی  $J = 1$  نشان داده شده است. عملکرد پروانه‌های دریایی بطور معمول در شعاع  $r/R = 0.7$  بسیار اهمیت دارد. بگونه‌ای که بیشترین سهم تولید تراست در محدوده این نسبت شعاعی

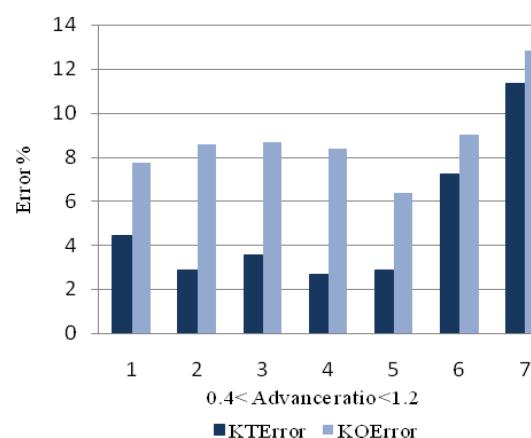
- خطای ناشی از تخمین اثرات لزج؛ استفاده از روابط تجربی در پیش‌بینی میزان ضریب درگ مقاطع و محاسبه نیروها و گشتاورهای لزجی دارای مقداری خطا است.
- وجود خطای نتایج تجربی؛ وجود مقداری خطا در وسایل اندازه‌گیری، طبق متن مقاله، وجود دارد [۱۱].



شکل (۱۰): درصد خطای نتایج پروانه جلو با نتایج تجربی



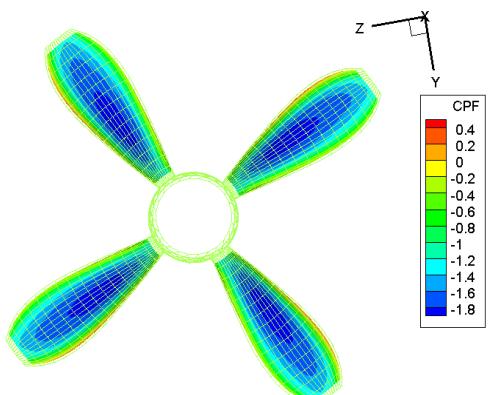
شکل (۱۱): درصد خطای نتایج پروانه عقب با نتایج تجربی



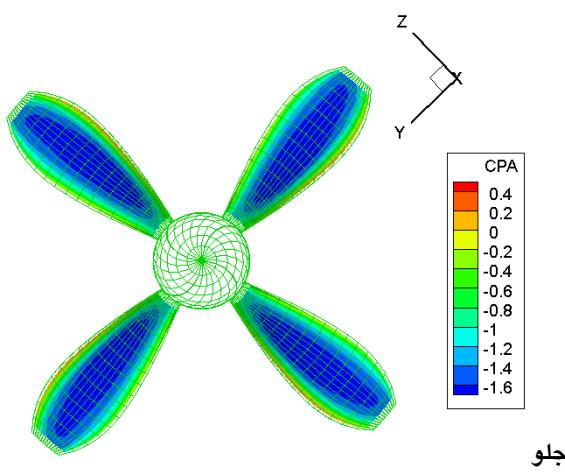
شکل (۱۲): درصد خطای نتایج پروانه معکوس‌گرد با نتایج تجربی

پروانه معکوس‌گرد ۳۶۸۶F-۳۶۸۷A در تحقیقی توسط

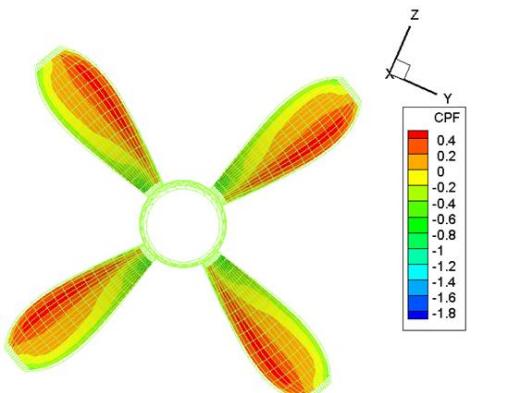
های (۲۲) و (۲۳) توزیع فشار در مقاطع مختلف شعاعی برای هر کدام از پروانه‌ها ارائه شده است.



شکل (۱۶): توزیع ضریب فشار روی سطح پشت پروانه



شکل (۱۷): توزیع ضریب فشار روی سطح پشت پروانه عقب

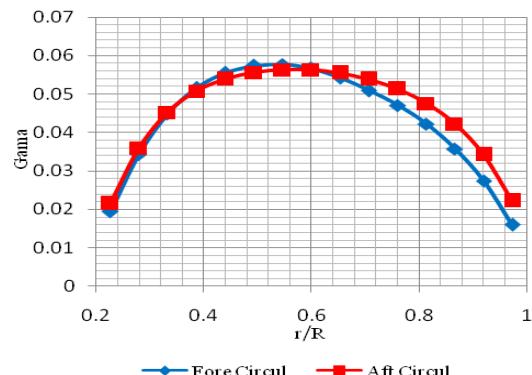


شکل (۱۸): توزیع ضریب فشار روی سطح جلوی پروانه جلو

قرار دارد. نسبت تراست تولید شده توسط پروانه‌های جلو و عقب به تراست کل، در شعاع  $r/R = 0.7$  عبارت است از:

$$T.R._{Fore} = \frac{Thtust_{Fore}}{Thtust_{total}} = 47.27 \quad (16)$$

$$T.R._{Aft} = \frac{Thtust_{Aft}}{Thtust_{total}} = 52.73 \quad (17)$$



شکل (۱۵): توزیع شعاعی جریان گردشی

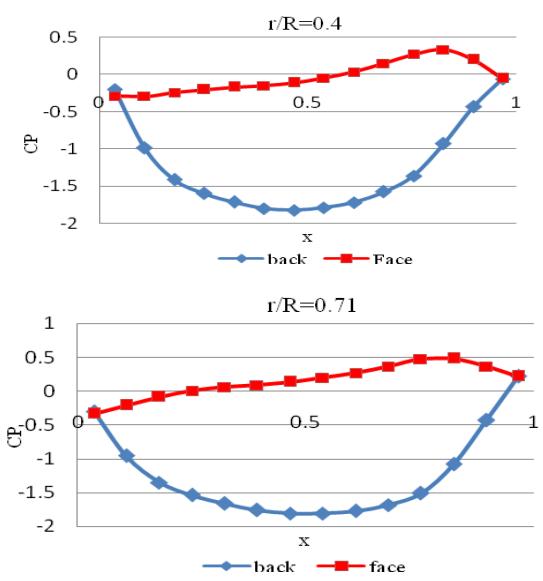
همان‌گونه که دیده می‌شود تراست تولید شده توسط پروانه عقب بیشتر است. این موضوع را همچنین می‌توان از توزیع جریان گردشی پروانه جلو و عقب در شکل (۱۵) پی برد. علت این امر را می‌توان در استفاده پروانه عقب از گردابه القایی ایجاد شده توسط پروانه جلو دانست.

#### ۴-۳- مشخصه‌های جریانی

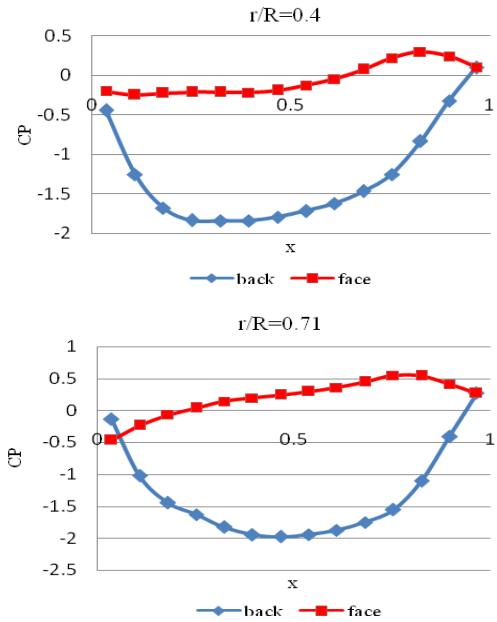
در این بخش سایر مشخصه‌های جریان عبوری از پروانه معکوس‌گرد را ارائه خواهیم داد. این نتایج شامل توزیع ضریب فشار روی سطوح پروانه جلو و عقب، توزیع جریان القایی در دیسکهای پشت پروانه‌های جلو و عقب و توزیع ضریب فشار در مقاطع مختلف شعاعی هر یک از پروانه‌ها است. تمام نتایج ارائه شده در ضریب پیشروی  $J = 1$  است.

در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) توزیع ضریب فشار روی سطح پشت پروانه جلو و عقب نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار فشار روی این سطوح مقدار کمتری نسبت به سطح جلو پروانه‌های جلو و عقب دارد، شکل‌های (۱۸) و (۱۹). با توجه به شکل‌های (۱۸) و (۱۹) می‌توان دید که بیشترین فشار در لبه ابتدایی پره رخ می‌دهد. علت این برخورد جریان ورودی به مقطع پره و وجود نقاط سکون در لبه ابتدایی پره است.

توزیع جریان القایی هر یک از پروانه‌های جلو و عقب در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. همچنین در شکل-



شکل (۲۲): ضریب فشار پروانه جلو در دو شعاع

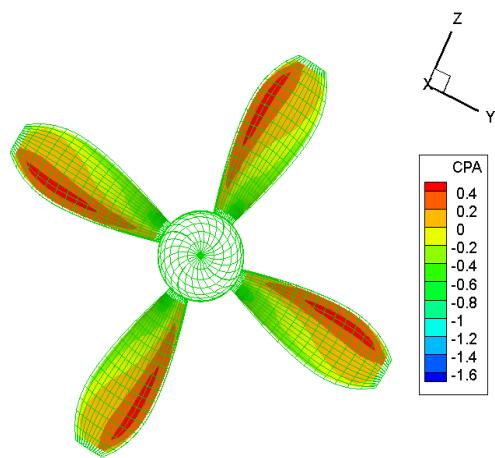


شکل (۲۳): ضریب فشار پروانه عقب در دو شعاع

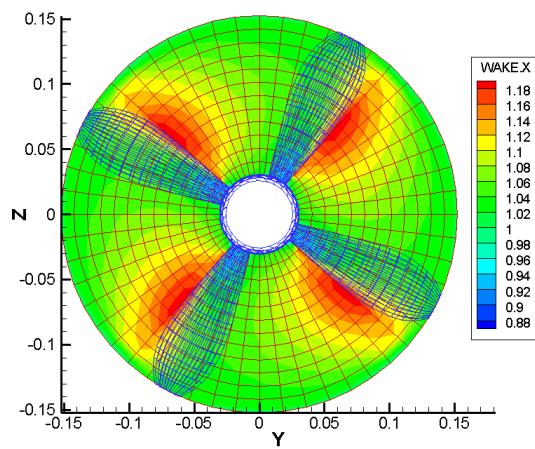
#### ۴- نتیجه گیری و جمع بندی

از تحلیل پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A می‌توان نتایج ذیر را عنوان نمود:

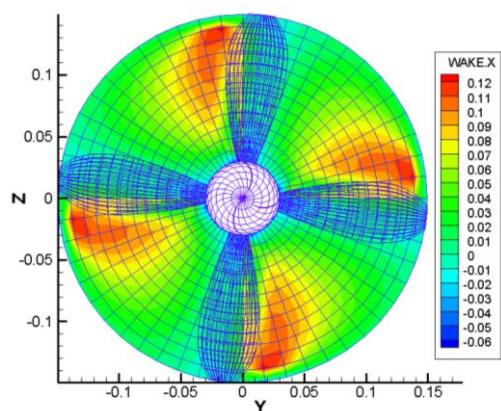
- طبق منحنی‌های عملکرد بدست آمده برای پروانه‌های جلو و عقب، شکل‌های (۷) و (۸) می‌توان بیان نمود که ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور برای پروانه عقب بیشتر از پروانه جلو است. علت این موضوع را به استفاده پروانه عقب از انرژی القا شده توسط پروانه جلو روی آن مرتبط دانست.



شکل (۱۹): توزیع ضریب فشار روی سطح جلوی پروانه عقب



شکل (۲۰): توزیع مولفه افقی جریان القایی در فاصله بین دو پروانه  
 $X / R = 0.22$



شکل (۲۱): توزیع مولفه افقی جریان القایی در پشت پروانه عقب  
 $X / R = 0.34$

- با توجه به توزیع فشار بدبست آمده روی هر کدام از پروانه‌های جلو و عقب، شکل‌های (۲۰) تا (۲۳)، می‌توان نتیجه گرفت؛ در پروانه معکوس‌گرد بار روی هر دو پروانه جلو و عقب تقسیم می‌شود و هر یک از پروانه‌ها سهم مجازی در تولید تراست کل دارند. لذا استفاده از این سامانه موجب اعمال بار کمتری روی پروانه‌ها شده، و توزیع فشار یکنواخت‌تری روی پرده‌ها خواهیم داشت. بنابراین احتمال وقوع پدیده حبابها در پروانه‌های معکوس-گرد کمتر خواهد شد.
- با توجه به توزیع میدان جریان القایی در پایین پروانه جلو و عقب، شکل‌های (۲۲) و (۲۳)، می‌توان نتیجه گرفت در پایین پروانه عقب، میدان جریان القایی یکنواخت‌تری وجود دارد. به عبارت دیگر، وجود پروانه عقب موجب دوران جریان در خلاف جهت جریان خروجی از پروانه جلو شده و باعث یکنواخت‌سازی جریان خروجی از پروانه معکوس‌گرد شده است. این موضوع در کاهش صدای تولیدی توسط پروانه معکوس‌گرد نسبت به پروانه تکی موثر است.
- با توجه به شکل (۹)، ضرایب هیدرودینامیکی پروانه معکوس‌گرد، از عوامل عملکردی هر کدام از پروانه‌های جلو و عقب بیشتر است. به عبارت دیگر، عملکرد هیدرودینامیکی پروانه معکوس‌گرد، از برهمنی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه جلو و عقب بدبست می‌آید که این موضوع با نتایج تجربی نیز سازگار است.
- با توجه به شکل (۱۵)، به طور کلی، توزیع جریان گردشی مربوط به پروانه عقب، بیشتر از توزیع جریان گردشی مربوط به پروانه جلو است. بنابراین تراست تولید شده توسط پروانه عقب بیشتر از پروانه جلو است. این موضوع را در شکل (۱۶) می‌توان دید.
- با توجه به شکل‌های (۱۷) و (۱۹)، استفاده از پروانه معکوس‌گرد موجب به حداقل رساندن گشتاورهای تولیدی توسط پروانه می‌شود. بنابراین استفاده از این سامانه رانش در وسایلی که حذف حرکت رولينگ اهمیت دارد، مانند اژدرها، توصیه می‌شود. همچنین، حذف گشتاور موجب عدم انتقال ارتعاشات اضافی به بدنه شناور شده، و موجب افزایش پایداری شناور می‌شود.

## ۵- مراجع

- 28, 2009.  
 Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T., Szantyr J.A."A complete design of ship propellers using the new computer system." Polish Maritime Research (59), Vol. 16, pp29-34, 2009. [۸]
- Hecker, R. , and McDonald N. A."The Effect of Axial Spacing and Diameter on the Powering Performance of Contra-rotating Propellers", David Taylor Model Basin, Report 1342, Feb.1960. [۹]
- Van Manen J. D. and Oosterveld M. W. C. "Model Tests on Contra-rotating Propellers", 7<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 196 . [۱۰]
- Miller, M.L. "Experimental Determination of Unsteady Forces on Contra-rotating Propellers for Application to Torpedoes", David Naval Ship Research and Development Center Report SPD-659-02, 1981. [۱۱]
- Carlton J. S. "Marine Propellers and Propulsion", Second edition, Published by Elsevier Ltd., 2007. [۱۲]
- Ghassemi H. "Hydrodynamic characteristics of marine propellers in steady and unsteady wake flows", Amirkabir Journal, Vol., 14, no 54-B (Mechanical Engineering), Spring 2003. [۱۳]
- Ghassemi, H., Kohansal, A.R., "Numerical evaluation of various levels of singular integrals, arising in BEM and its application in hydrofoil analysis", Applied Mathematics and Computation, 213 (2009), pp.277-289. [۱۴]
- Cox, B. D. and Reed, A. M. "Contra-rotating propellers—design theory and application", In Propellers/ Shafting '88 Symposium, Virginia Beach, 1988. [۱]
- Tsakonas,W.R.Jacobs. "Prediction of Steady and Unsteady Loads and Hydrodynamics Forces on Counter-rotating Propellers", Journal of Ship Research. 27(3), pp179-214, 1983. [۲]
- Yang C. J., Tamashima M., Wang G. Q., Yamazaki R. "Prediction of the Steady Performance of Contra-Rotating Propellers by Lifting Surface Theory", Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects 82, 1991. [۳]
- Yang C. J., Tamashima M., Wang G. Q., Yamazaki R.,Koizuka H. "Prediction of the Unsteady Performance of Contra-Rotating Propellers by Lifting Surface Theory", Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects 83, 1992. [۴]
- Hoshino, T "Experimental and Theoretical Analysis of Propeller Shaft Forces of Contra-Rotating Propellers and Correction with Full Scale Data", Propeller/Shafing'94 Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers Virginia Beach, USA, 1994. [۵]
- Gu, H. & Kinnas, S.A. "Modeling of Contra-Rotating and Ducted Propellers via Coupling of a Vortex-Lattice with a Finite Volume Method", Propellers/Shafing 2003 Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia Beach, USA, 2003. [۶]
- Ghassemi, H. "Hydrodynamic performance of coaxial contra-rotating propeller (CCRP) for large ships," Polish Maritime Research, Vol., 16, pp22- [۷]



- ‘ Displacement ship
- ‘ Generator line
- ‘ Key blade
- ‘ Rake angle
- ‘ Skew angle
- ‘ Kutta condition
- ‘ Perturbation potential

