تحليل عددي عملكرد هيدروديناميكي و جريان عبوري از پروانه معكوس‌گرد

حسن قاسمي[i] *؛ محمد حسن مقدس[ii]؛ محسن طاهري نسب[iii]

چكيده

تاكنون روش‌هاي محاسباتي مختلفي براي تحليل پروانه‌هاي دريايي به كار گرفته شده اند. در اين مقاله، روش المان مرزي براي تحليل عددي عملكرد هيدروديناميكي دائم پروانه معكوس‌گرد توسعه داده شده است. جريان پتانسيل اطراف پروانه جلو و پروانه عقب مورد بررسي قرار گرفته است. همچنين، با محاسبه توزيع جريان گردابي القايي، برهم‌كنش ميان پروانه هاي جلو و عقب (پروانه معكوس‌گرد) به‌كارگرفته شد. نتايج شامل ضرايب عملكرد هيدروديناميكي، نيروها و گشتاور كلي پروانه معكوس‌گرد، توزيع جريان گردشي، مقايسه گردابه القايي در فاصله بين دو پروانه و گردابه القايي در پايين پروانه عقب است. نتايج عددي نشان مي‌دهد كه پيش‌بيني عملكرد هيدروديناميكي، برابري خوبي با نتايج تجربي دارند.

كلمات كليدي: پروانه معكوس‌گرد، روش المان مرزي ، توزيع گردابه القايي، عملكرد هيدروديناميكي 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

۱- مقدمه

با گسترش تقاضا براي افزايش حمل كالا و سرعت سامانه هاي دريايي، مراكز دريايي مطالعات خود را بر روي ابزارهاي رانشي كه بتواند اين نياز را تامين نمايد، معطوف نمودند. امروزه استفاده از پروانه‌هاي معكوس‌گرد براي افزايش سرعت دركشتي‌هاي جابجايي[۱] و يا در وسايل زيرآبي (مانند اژدرها) مورد توجه محققان قرار گرفته است.

پروانه‌هاي معكوس‌گرد از دو پروانه تشكيل شده‌اند كه بر روي يک محور هم‌راستا نصب شده اند و در خلاف جهت يكديگر دوران مي‌نمايند . با وجود معايبي مانند پيچيدگي

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۹/۸/۸
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۳/۱٦

i * نويسنده مسئول و دانشيار، دانشگاه صنعتي اميركبير، دانشكده مهندسي دريا؛ gasemi@aut.ac.ir
ii استاديار، دانشگاه صنعتي مالک‌اشتر، دانشكده مهندسي مكانيک و هوافضا
iii كارشناس ارشد، دانشگاه صنعتي مالک‌اشتر، دانشكده مهندسي دريايي

طراحي هيدروديناميكي و هندسي و وزن بيشتر در نتيجه به كار بردن موتور مورد نياز پروانه، پروانه‌هاي معكوس‌گرد در مقايسه با پروانه‌هاي تكي داراي مزاياي بسياري هستند. كه از آن جمله:

الف- به طور كلي، انرژي دوراني ايجاد شده توسط پروانه، نه تنها نقشي در توليد تراست ندارد، بلكه موجب اتلاف انرژي نيز مي‌شود. مهم ترين مزيت پروانه‌هاي معكوس‌گرد، بهبود راندمان در اثر بازيافت انرژي به وسيله پروانه عقبي است. در حقيقت، پروانه عقب بخشي از انرژي دوراني داده شده به آب توسط پروانه جلو را ذخيره مي‌نمايد. بنابراين، استفاده از اين پروانه‌ها در كاهش سوخت مصرفي اثر زيادي خواهد داشت.

ب- توانايي ايجاد تعادل در گشتاور بين پروانه‌ها را دارد. از اين رو، براي حذف گشتاور معكوس در وسايلي كه حفظ پايداري در آنها اهميت دارد، استفاده مي‌شود.

ج- توزيع بار كم‌تري روي پره‌ها وجود داشته، در نتيجه وقوع حبابها در اين پروانه‌ها به تاخير خواهد افتاد. همچنين توزيع بار كم‌تر، اين امكان را مي دهد كه اين پروانه ها با قطر مشابه، توان بيشتري توليد نمايند.

د- از آنجا كه در پايين پروانه معكوس‌گرد، ميدان گردابه يكنواخت‌تري وجود دارد، صداي كمتري توسط پروانه معكوس‌گرد ايجاد مي‌شود.

در زمينه بررسي چگونگي عملكرد و عوامل موثر بر عملكرد پروانه‌هاي معكوس‌گرد كارهاي محدودي توسط محققين به صورت تجربي و يا عددي به چاپ رسيده است. كاكس و ريد [۱]، تسكوناس [۲] با استفاده از تئوري سطوح بالابر به محاسبه نيروهاي هيدروديناميكي وارد بر پروانه معكوس‌گرد پرداخته است. همچنين يانگ و همكارانش [۴-۳] با بكارگيري همين تئوري اثرات متقابل گردابه‌هاي دنباله‌اي دو پروانه در حالت پايدار و ناپايدار بكار گرفته است. هوشينو نيز تحليل نيروهاي وارد برمحور پروانه‌هاي معكوس‌گرد پرداخته و نتايج بدست آمده را با اطلاعات تجربي كه توسط خود او انجام شده است، مقايسه نموده است [۵]. در تحقيق ديگري گو و كيناس با بكارگيري همزمان روش شبكه گردابي و روش حجم محدود براي پروانه‌هاي معكوس‌گرد و پروانه‌هاي داكت‌دار، بر مبناي حل اويلر براي كل ميدان جريان، به محاسبه برهم‌كنش بين دو پروانه در پروانه‌هاي معكوس‌گرد، و يا برهم‌كنش بين پروانه و داكت در پروانه‌هاي داكت‌دار پرداخته‌اند [۶].

قاسمي نيز در تحقيقي به طراحي پروانه معكوس‌گرد براي دو نمونه شناور پرداخته است. در اين تحقيق، همچنين مقايسه- اي ميان عملكرد پروانه معكوس‌گرد و پروانه تكي، براي دو شناور مورد نظر انجام شده است [۷]. كرونويز در تحقيق خود چگونگي به كارگيري كدهاي رايانه اي را بر مبناي تئوري شبكه گردابي، تشريح نموده است. در مقاله حاضر، از روش وي با اعمال تغييراتي بر مبناي روش المان مرزي، استفاده شده است [۸].

در زمينه تحقيقات تجربي، نتايج مربوط به تست تجربي تعدادي پروانه معكوس‌گرد، توسط هكر انتشار يافته است. در اين مقاله هكر علاوه بر محاسبه عملكرد هر يک از پروانه‌ها به بررسي تجربي اثر برخي پارامترها مانند قطر پروانه جلو، فاصله بين دو پروانه و گام پروانه‌ها پرداخته است [۹]. همچنين ون‌مانن و استرولد آزمايشهاي تجربي را روي يک سري سيستماتيک از پروانه‌هاي معكوس‌گرد كه پروانه جلويي آنها چهار پره‌اي و پروانه عقبي پنج پره‌اي است، انجام داده است [۱۰].

نتايج آزمايش چند نمونه پروانه معكوس‌گرد نيز توسط ميلر منتشر شده است.كه در آن نيروهاي وارده بر پروانه معكوس- گرد در حالت ناپايدار براي جريان يكنواخت و غيريكنواخت محاسبه شده است [۱۱].

پروانه معكوس¬گرد در سرعت دوراني بالا كه بيشتر براي اژدرها بكار مي رود، تحليل و محاسبات اينگونه پروانه ها مشكل است و هنوز كارهاي تحقيقاتي با استفاده از روش المان مرزي انجام نشده است. در اينجا، سعي كرديم با استفاده از روش هاي عددي، روش المان مرزي و شرايط فيزيكي مسئله نتايج خوبي بدست آيد. اين نتايج شامل توزيع فشار روي پره ها، عملكرد هيدروديناميكي پروانه هاي جلويي و عقبي و عكس العمل اين دو پروانه است. محاسبه سرعت القايي ناشي از پروانه جلويي كه بعنوان جريان ورودي به پروانه عقبي است و عكس العمل اين دو پروانه از مسايل مهم بشمار مي رود كه در اين مقاله به آن اشاره شده است.

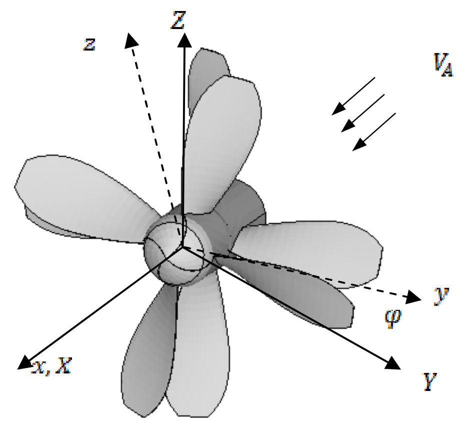
۲- معادلات بنيادي

۲-۱- سامانه مختصات

فرض شود پروانه جلو با سرعت زاويه‌اي ω_f در جهت پادساعتگرد و پروانه عقب با سرعت زاويه‌اي ω_a در جهت ساعتگرد در سيال غيرويسكوز، تراكم‌ناپذير و جريان غيرچرخشي، دوران مي‌نمايد. جريان يكنواخت V_A در راستاي محوري از بالادست به پروانه جلو برخورد مي‌نمايد.

سامانه مختصات كلي $O-XYZ$ را، كه O در مركز پروانه قرار گرفته است، به گونه‌اي تعريف مي‌نماييم كه X در

راستاي محور پروانه و در جهت پايين باشد. محور Z منطبق بر خط مولد[2] پره اصلي[3] است و محور Y نيز سامانه مختصات راستگرد را كامل مي نمايد. سامانه مختصات محلي $O-xyz$ نيز در شكل (۱) نشان داده شده است.



شكل (۱): سامانه مختصات پروانه معكوس¬گرد

براي مختصات استوانه‌اي، مختصات زاويه‌اي θ در جهت ساعتگرد از محور z اندازه‌گيري مي‌شود. مختصات r از محور اندازه‌گيري مي‌شود. بنابراين، سامانه مختصات دكارتي با استفاده از روابط زير به سامانه مختصات استوانه‌اي انتقال داده مي‌شود.

$$\begin{cases} x = x \\ y = -rs \\ z = +rc \end{cases} \qquad (۱)$$

كه در آن

$$\begin{cases} r = \sqrt{y^2 + z^2} \\ \theta = \tan^{-1}(-y/z) \end{cases} \qquad (۲)$$

۲-۲- هندسه پروانه

براي توليد هندسه پروانه، ابتدا هندسه پره اصلي پروانه عقب در مختصات دكارتي تشكيل مي‌شود، سپس اين مختصات به مختصات استوانه‌اي نگاشته مي‌شود. در مرحله بعد با توجه مشخص بودن مختصات استوانه‌اي پره اصلي پروانه عقب، مختصات استوانه‌اي و دكارتي ساير پره‌ها بدست مي‌آيد. در مورد تشكيل هندسه پروانه جلو نيز همين فرآيند تكرار مي‌شود. سپس با توجه به فاصله بين دو پروانه، مختصات پروانه جلو، در راستاي محوري منتقل داده مي‌شود.

بطورمعمول، مقاطع پره در شعاع‌هاي مختلف در مختصات دوبعدي (شبيه مقطع فويل) مشخص است. با تعريف هندسه مقاطع پايه، اين امكان فراهم مي‌شود كه مختصات هر نقطه P روي سطح پره اصلي، مشخص شود. براي پروانه از رابطه (۳) مي‌توان استفاده نمود [۱۲].

$$\begin{cases} x_P = -[r\tan(\theta_R) + r\theta_S\tan(\beta_G)] + (0.5 - x_c)\sin(\beta_G) + y_{u,L}\cos(\beta_G) \\ y_P = r\sin\left[\beta_G + \dfrac{180[(0.5 - x_c)\cos(\beta_G) - y_{u,L}\cos(\beta_G)]}{\pi r}\right] \\ z_P = r\cos\left[\beta_G + \dfrac{180[(0.5 - x_c)\cos(\beta_G) - y_{u,L}\cos(\beta_G)]}{\pi r}\right] \end{cases} \qquad (۳)$$

كه در آن β_G زاويه گام هندسي، θ_R زاويه ريك[4]، و θ_S زاويه اسكيو[5]، $y_{u,L}$ مختصات عرضي هر نقطه روي سطح بالايي و پايين فويل، x_c مختصات طولي هر نقطه روي سطح فويل، r شعاع هر مقطع است.

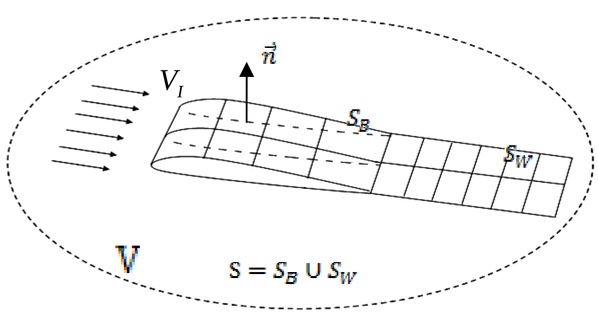
براي تبديل مختصات محلي به مختصات كلي، به عبارت ديگر، براي بدست آوردن مختصات نقاط ساير پره‌ها از نگاشت (۴) استفاده مي‌نماييم كه φ زاويه فاز هر پره است (شكل ۱).

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

۲-۳- سطح هندسي دنباله

فرض شود سطح دنباله S_W بسيار نازک است و هيچ‌گونه پرشي در جريان و فشار روي سطح دنباله وجود نداشته، ولي پرش در مقادير پتانسيل مي‌تواند وجود داشته باشد. سطوح مختلف در شكل (۲) نشان داده شده است. در تحليل هيدروديناميكي براي ارضاي شرط كوتا[6]، لازم است هندسه سطح دنباله مشخص شود [۱۲].

همان طور كه بيان شد، براي سادگي فرايند تحليل، ضخامتي براي سطح دنباله در نظر گرفته نمي‌شود. اما از آنجا كه لبه انتهايي هر مقطع داراي ضخامت است، براي تعيين مختصات نقاط دنباله در روي لبه انتهايي پره، از ميانگين مختصات سطوح بالا و پايين پره استفاده مي شود. كل ميزان پيشروي گردابه در راستاي محور پروانه برابر با پيشروي پروانه پس از دو چرخش كامل است. از نظر تجربي، اين ميزان پيشروي براي ارضاي شرط كوتا كافي است [۱۳].



شكل (۲): جسم در مقابل جريان

۲-۴- جريان پتانسيل و حل معادله حاکم

با توجه به فرضيات بيان شده در بخش ۲-۱، پتانسيل اغتشاشي[۷] معادله لاپلاس را ارضا مي‌نمايد. ناحيه بسته V با مرز S را در نظر بگيريد (شکل ۲). مساله مقدار مرزي، براي معادله پتانسيل، به صورت مساله نيومن، مي‌تواند به صورت رابطه (۵) بيان شود.

$$\begin{cases}\nabla^2\phi=0 & \text{in V}\\ \dfrac{\partial\phi}{\partial n}=\phi_n & \text{on S}\end{cases} \qquad (۵)$$

که در آن n بردار عمود بر سطح است. حل بايد شرط مرزي مساله روي مرز S_B را ارضا نمايد. شرط مرزي سينماتيکي که بايد روي مرز S_B ارضا شود، به صورت رابطه (۶) بيان مي‌شود.

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}=-V_I.n \qquad (۶)$$

که در آن

$$V_I=V_A+\omega\times r+V_{ind} \qquad (۷)$$

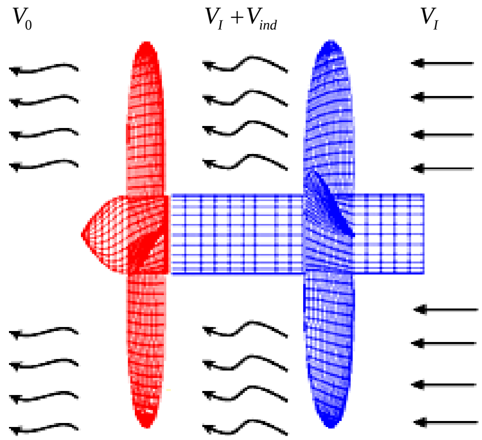
در اينجا، ω سرعت دوراني پروانه، V_A سرعت پيشروي و V_{ind} سرعت القايي هر کدام از پروانه‌هاي جلو و عقب از ديگري است (شکل ۳).

ارضاي شرط کوتا در لبه انتهايي پره براي تعيين گردش جريان بايد مورد توجه قرار گيرد. در بيشتر موارد شرط کوتا به اين صورت بيان مي‌شود که سرعت جريان در لبه انتهايي بايد داراي مقدار محدودي باشد. به عبارت ديگر؛

$$|\nabla\phi|_{T.E.}<\infty \qquad (۸)$$

مساله پتانسيل با در نظر گرفتن سطح پروانه‌هاي جلو و عقب و بکارگيري قضيه گرين، براي يک نقطه ميداني p روي سطح پروانه‌هاي جلو و عقب S_B، به صورت رابطه (۹) تبديل خواهد شد:

$$2\pi\phi(p)=\iint_{S_B}\left[\phi(q)\frac{\partial}{\partial n_q}\frac{1}{R(p,q)}-(V_I.n_q)\frac{1}{R(p,q)}\right]dS+\iint_{S_W}\Delta\phi(q)\frac{\partial}{\partial n_q}\frac{1}{R(p,q)}dS \qquad (۹)$$



شکل (۳): جريان عبوري از پروانه معکوس¬گرد

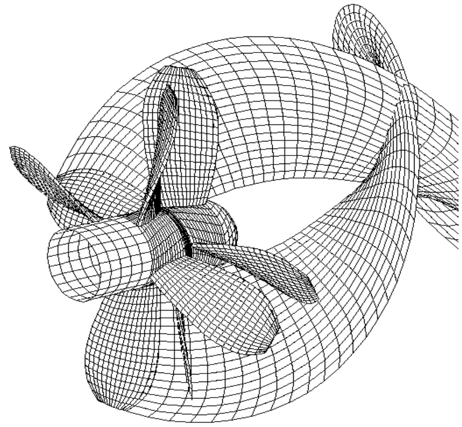
S_B شامل سطح پروانه جلو S_{Bf} و سطح پروانه عقب S_{Ba} است. S_W شامل سطح دنباله پروانه جلو S_{Wf} و سطح دنباله پروانه عقب S_{Wa} است شکل (۴). فرم ماتريسي معادله (۹) به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$[D][\phi]=[S][\phi_n]+[W][\Delta\phi] \qquad (۱۰)$$

که ϕ_n با توجه به شرط مرزي سينماتيک بدست آمد. ϕ پتانسيل اغتشاشي مجهول و $\Delta\phi$ پرش پتانسيلي مجهول در لبه انتهايي پره است. ماتريس‌هاي $[D]$، $[S]$ و $[W]$ شامل ضرايب اثر هستند که از اين ضرايب از روش عددي و تحليلي محاسبه مي‌شوند [۱۴]. درايه‌هاي اين ماتريس‌ها به صورت رابطه (۱۱) محاسبه مي‌شوند:

$$\begin{cases}S_{ij}=\sum_{k=1}^{K}\left[\iint_{S_j}\left(-\dfrac{1}{2\pi\,\mathrm{r_{ijk}}}\right)ds_j\right]\\ D_{ij}=\sum_{k=1}^{K}\left[\iint_{S_j}\dfrac{\partial}{\partial n_j}\left(-\dfrac{1}{2\pi\,\mathrm{r_{ijk}}}\right)ds_j\right]\\ W_{ij}=\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\left[\iint_{S_W}\dfrac{\partial}{\partial n_j}\left(-\dfrac{1}{2\pi\,\mathrm{r_{ilk}}}\right)ds_l\right]\end{cases} \qquad (۱۱)$$

که r_{ijk} و r_{ilk} فاصله از نقطه کنترلي المان k ام پره، تا نقطه انتگرالي روي s_j و S_W است.



شكل (۴): سطوح المان براي پروانه و دنباله براي حل

۲-۵- ۲-۴- ضرايب هيدروديناميكي

بعد از حل معادله (۱۵)، و بدست آوردن مقادير مجهول پتانسيل، توزيع سرعت و فشار روي پروانه‌هاي جلو وعقب محاسبه مي‌شود. با داشتن توزيع فشار نيروها و گشتاورها، ضرايب هيدروديناميكي شامل ضريب تراست و ضريب گشتاور و راندمان هر كدام از پروانه‌ها تعيين مي‌شود. ضريب پيشروي هر دو پروانه جلو عقب برابر ضريب پيشروي پروانه جلو در نظر گرفته مي‌شود. براي پروانه جلو داريم:

$$K_{Tf}=\frac{T_f}{\rho\omega_f^{\,2}D_f^{\,4}},\qquad K_{Qf}=\frac{Q_f}{\rho\omega_f^{\,3}D_f^{\,5}}$$
$$\eta=\frac{K_{Tf}}{K_{Qf}}\frac{J}{2\pi},\qquad J=\frac{V_A}{\omega_f D_f} \quad (۱۲)$$

كه ω_f سرعت دوراني پروانه جلو، D_f قطر پروانه جلو، T_f و Q_f تراست و گشتاور توليده شده توسط پروانه جلو است. براي پروانه عقب نيز داريم:

$$K_{Ta}=\frac{T_a}{\rho\omega_a^{\,2}D_a^{\,4}},\qquad K_{Qf}=\frac{Q_a}{\rho\omega_a^{\,3}D_a^{\,5}}$$
$$\eta=\frac{K_{Ta}}{K_{Qa}}\frac{J}{2\pi},\qquad J=\frac{V_A}{\omega_a D_a} \quad (۱۳)$$

كه ω_a سرعت دوراني پروانه عقب، D_a قطر پروانه عقب، T_a و Q_a تراست و گشتاور توليده شده توسط پروانه عقب است. تراست كل و گشتاور كل پروانه معكوس‌گرد نيز به صورت رابطه (۱۴) محاسبه مي‌شود:

$$T=|T_f|+|T_a|$$
$$Q=|Q_f|-|Q_a| \quad (۱۴)$$

در پايان، با مشخص بودن تراست و گشتاور پروانه جلو و عقب و ضرايب عملكردي هر كدام از پروانه‌ها، عوامل عملكردي پروانه معكوس‌گرد محاسبه مي‌شود:

$$K_T=K_{Tf}+K_{Ta}$$
$$K_Q=K_{Qf}+K_{Qa}$$
$$\eta=\frac{K_T}{K_Q}\frac{J}{2\pi} \quad (۱۵)$$

۳- نتايج تحليل عددي

۳-۱- عملكرد هيدروديناميكي

در اين بخش، نتايج تحليل يک نمونه پروانه معكوس‌گرد ارائه شده است. پروانه معكوس‌گرد متشكل از دو پروانه به نامهاي 3686F-3687A است. پروانه جلو 3686F چپگرد و پروانه عقب 3687A راست‌گرد است. مشخصات هندسي اين پروانه‌ها در مرجع [۱۱] ارائه شده است. خلاصه‌اي از مشخصات هندسي اين پروانه‌ها در جداول (۱) و (۲) بيان شده است.

نمايي از هندسه اين پروانه معكوس‌گرد نيز در شكل (۵) نشان داده شده است. سطوح دنباله در دو چرخش دوران در شكل (۶) نشان داده است. پروانه معكوس‌گرد 3686F-3687A در ضرايب پيشروي مختلف مورد تحليل قرار گرفت. نتايج تست تجربي پروانه معكوس‌گرد 3686F-3687A توسط ميلر ارائه شده است [۱۱]. در تحقيق حاضر، از نتايج تجربي ميلر براي اعتبارسنجي نتايج عددي استفاده شده است.

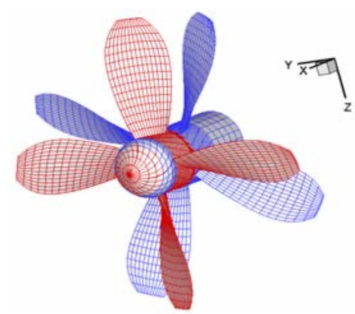
جدول (۱): مشخصات هندسه پروانه 3686F

موقعيت	جلويی
تعداد پره ها	۴
قطر (متر)	۰/۳۰۵۲
گام در شعاع ۰/۷R (متر)	۰/۳۰۴۹
نسبت سطح گسترش يافته	۰/۳۰۳
جهت دوران	چپ گرد
نوع مقطع پره	NACA 66 a=۰/۸

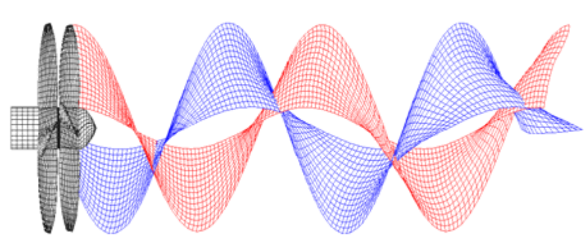
جدول (۲): مشخصات هندسه پروانه 3687A

موقعيت	عقبی
تعداد پره ها	۴
قطر (متر)	۰/۲۹۹۱
گام در شعاع ۰/۷R (متر)	۰/۳۹۶۸
نسبت سطح گسترش يافته	۰/۳۲۴
جهت دوران	راست گرد
نوع مقطع پره	NACA 66 a=۰/۸

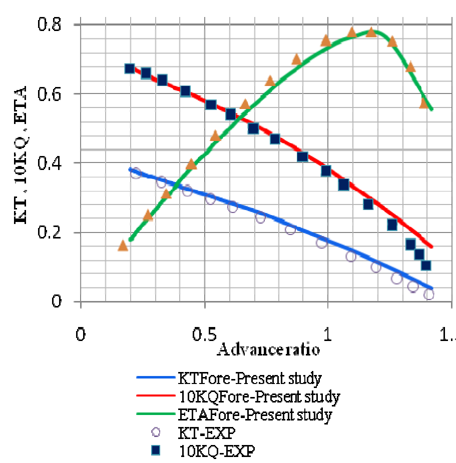
منحنيهاي عملکرد هيدروديناميکي پروانه جلو 3686F در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنين منحنيهاي عملکرد هيدروديناميکي پروانه عقب 3687A در شکل (۸) ارائه شده است. منحنيهاي عملکرد هيدروديناميکي پروانه معکوسگرد 3686F-3687A نيز در شکل (۹) ارائه شده و با نتايج تجربي مقايسه شده است.



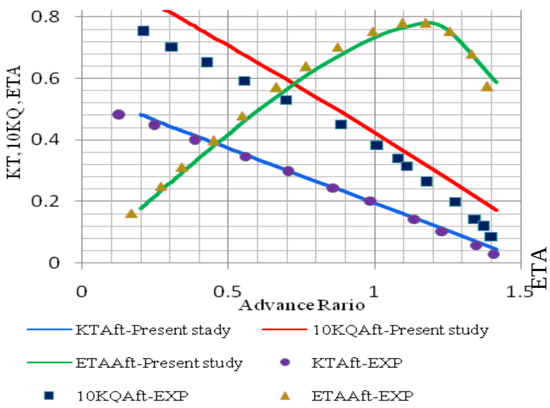
شکل (۵): پروانه معکوس¬گرد *3686F-3687A*



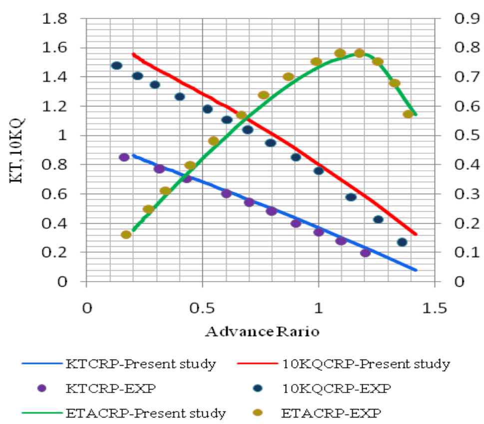
شکل (۶): سطوح دنباله در دو چرخش دوران پروانه معکوس¬گرد



شکل (۷): عوامل عملکرد هيدروديناميکي پروانه جلو



شکل (۸): عوامل عملکرد هيدروديناميکي پروانه عقب



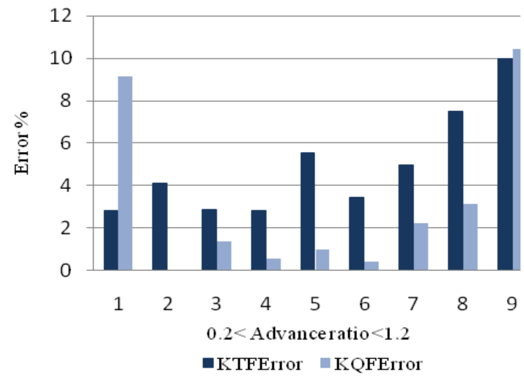
شکل (۹): عملکرد هيدروديناميکي پروانه3686F-3687A

۳-۲- تحليل خطا

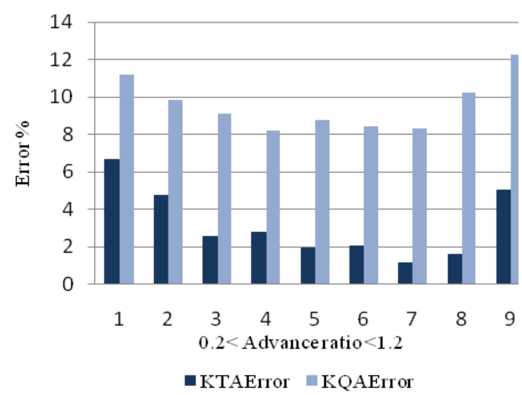
درصد خطاي نسبي نتايج تحقيق حاضر با نتايج تجربي، در مورد عوامل عملکردي هر يک از پروانههاي جلو وعقب، و نتايج کل در شکلهاي (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. خطاهاي ديده شده ناشي از عوامل زير است :

- وجود خطا در طراحي هندسه؛ در تحقيق حاضر سعي شده است بيشترين دقت در توليد هندسه پروانه طبق مشخصات هندسي داده شده، بهکار برده شود. به هر حال وجود مقداري اختلاف بين نمونه شبيهسازي شده و نمونه واقعي وجود دارد.
- خطاي ذاتي ناشي از روشهاي عددي؛ اين خطا در محاسبه انتگرالهاي عددي ضرايب اثر، محاسبه مشتقات عددي از پتانسيل، گسستهسازي معادلات انتگرالي و ساير محاسبات عددي است.

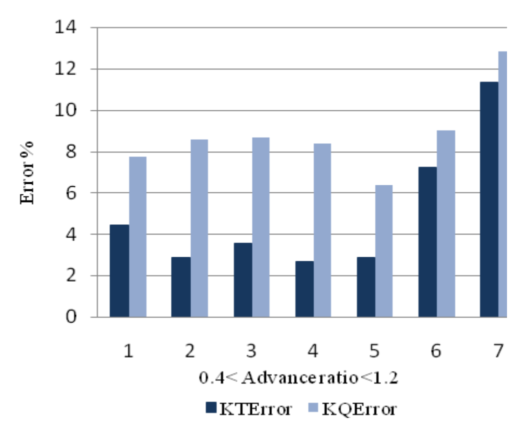
- خطاي ناشي از تخمين اثرات لزج؛ استفاده از روابط تجربي در پيش‌بيني ميزان ضريب درگ مقاطع و محاسبه نيروها و گشتاورهاي لزجي داراي مقداري خطا است.
- وجود خطا در نتايج تجربي؛ وجود مقداري خطا در وسايل اندازه‌گيري، طبق متن مقاله، وجود دارد [۱۱].



شکل (۱۰): درصد خطاي نتايج پروانه جلو با نتايج تجربي

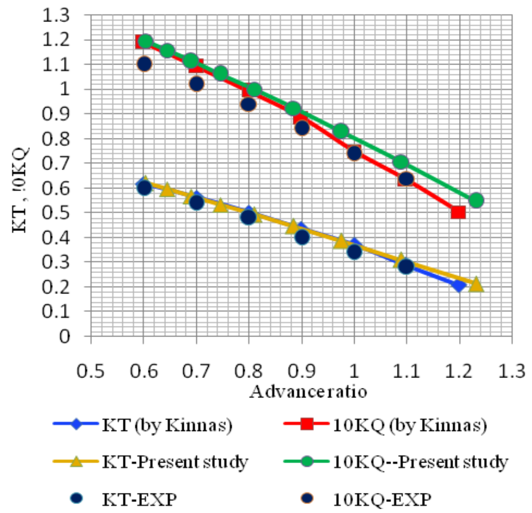


شکل (۱۱): درصد خطاي نتايج پروانه عقب با نتايج تجربي

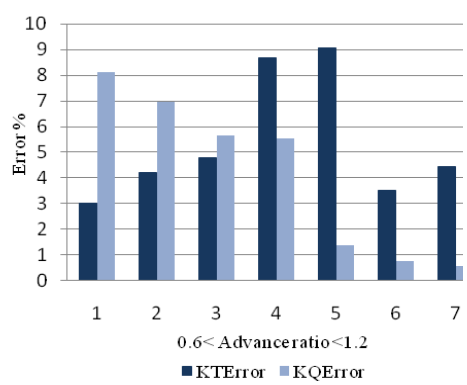


شکل (۱۲): درصد خطاي نتايج پروانه معکوس¬گرد با نتايج تجربي

پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A در تحقيقي توسط *کيناس* در سال ۲۰۰۳ با بکارگيري همزمان روش شبکه گردابي و روش حجم محدود مورد تحليل و بررسي قرار گرفت [۴]. در شکل (۱۳) مقايسه ميان نتايج تحقيق حاضر و تحقيق *کيناس* نشان داده شده است. درصد خطاي نتايج تحقيق *کيناس* با نتايج تجربي، در مورد عوامل عملکردي پروانه معکوس‌گرد 3686F-3687A در شکل (۱۴) ارائه شده است. بنابراين، مي‌توان نتايج تحقيق حاضر را با دقت مناسبي قابل قبول دانست.



شکل (۱۳): مقايسه نتايج روش حاضر و روش عددي مشابه و نتايج تجربي



شکل (۱۴): درصد خطاي نتايج عددي مشابه با نتايج تجربي

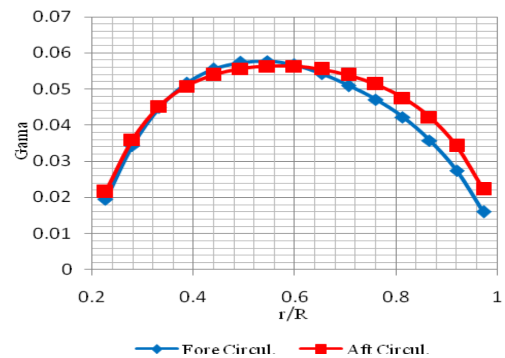
۳-۳- توزيع جريان گردشي، تراست و گشتاور

توزيع شعاعي جريان گردشي نيز براي هر کدام از پروانه‌هاي جلو و عقب مورد بررسي قرار گرفته است. در شکل (۱۵) توزيع جريان گردشي پروانه‌ها در ضريب پيشروي $J = ۱$ نشان داده شده است. عملکرد پروانه‌هاي دريايي بطورمعمول در شعاع $r/R = ۰/۷$ بسيار اهميت دارد. بگونه‌اي

که بیشترین سهم تولید تراست در محدوده این نسبت شعاعي قرار دارد. نسبت تراست تولید شده توسط پروانه‌هاي جلو وعقب به تراست کل، در شعاع $r/R = ۰/۷$ عبارت است از:

$$T.R._{Fore} = \frac{Thtust_{Fore}}{Thtust_{total}} = 47.27 \quad (۱۶)$$

$$T.R._{Aft} = \frac{Thtust_{Aft}}{Thtust_{total}} = 52.73 \quad (۱۷)$$



شکل (۱۵): توزیع شعاعي جریان گردشي

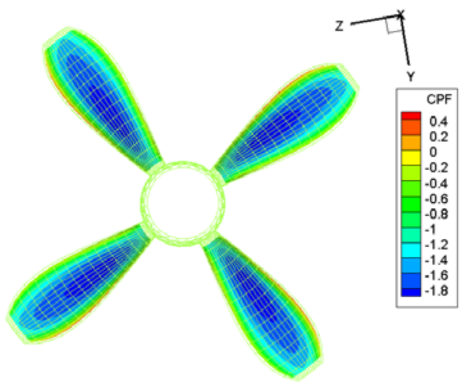
همان‌گونه که دیده مي‌شود تراست تولید شده توسط پروانه عقب بیشتر است. این موضوع را همچنین مي‌توان از توزیع جریان گردشي پروانه جلو و عقب در شکل (۱۵) پي برد. علت این امر را مي‌توان در استفاده پروانه عقب از گردابه القایي ایجاد شده توسط پروانه جلو دانست.

۳-۴- مشخصه‌هاي جریاني

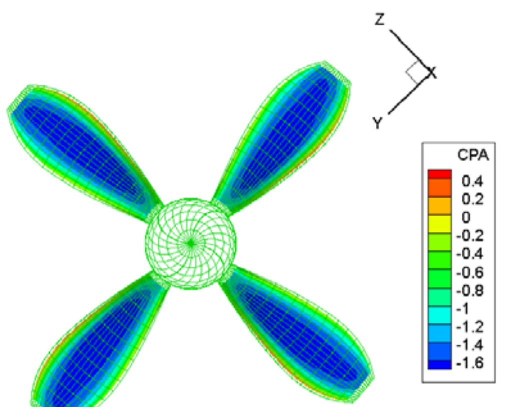
در این بخش سایر مشخصه‌هاي جریان عبوري از پروانه معکوس‌گرد را ارائه خواهیم داد. این نتایج شامل توزیع ضریب فشار روي سطوح پروانه جلو وعقب، توزیع جریان القایي در دیسک‌هاي پشت پروانه‌هاي جلو وعقب و توزیع ضریب فشار در مقاطع مختلف شعاعي هر یک از پروانه‌ها است. تمام نتایج ارائه شده در ضریب پیشروي $J = ۱$ است.

در شکل‌هاي (۱۶) و (۱۷) توزیع ضریب فشار روي سطح پشت پروانه جلو و عقب نشان داده شده است. همان‌گونه‌که دیده مي‌شود مقدار فشار روي این سطوح مقدار کمتري نسبت به سطح جلو پروانه‌هاي جلو و عقب دارد، شکل‌هاي (۱۸) و (۱۹). با توجه به شکل‌هاي (۱۸) و (۱۹) مي‌توان دید که بیشترین فشار در لبه ابتدایي پره رخ مي‌دهد. علت این برخورد جریان ورودي به مقطع پره و وجود نقاط سکون در لبه ابتدایي پره است.

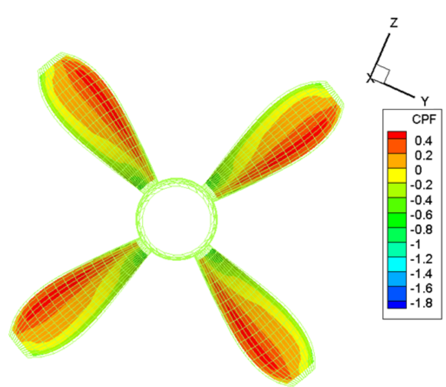
توزیع جریان القایي هر یک از پروانه‌هاي جلو و عقب در شکل‌هاي (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. همچنین در شکل-هاي (۲۲) و (۲۳) توزیع فشار در مقاطع مختلف شعاعي براي هر کدام از پروانه‌ها ارائه شده است.



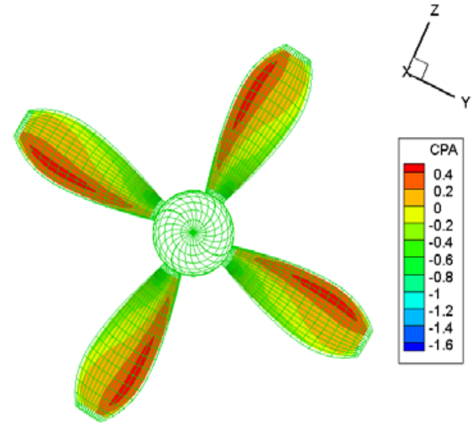
شکل (۱۶): توزیع ضریب فشار روي سطح پشت پروانه جلو



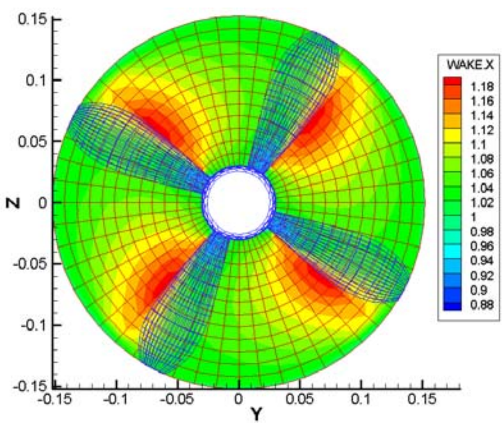
شکل (۱۷): توزیع ضریب فشار روي سطح پشت پروانه عقب



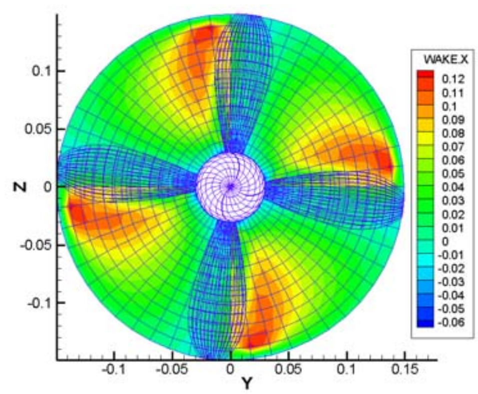
شکل (۱۸): توزیع ضریب فشار روي سطح جلوي پروانه جلو



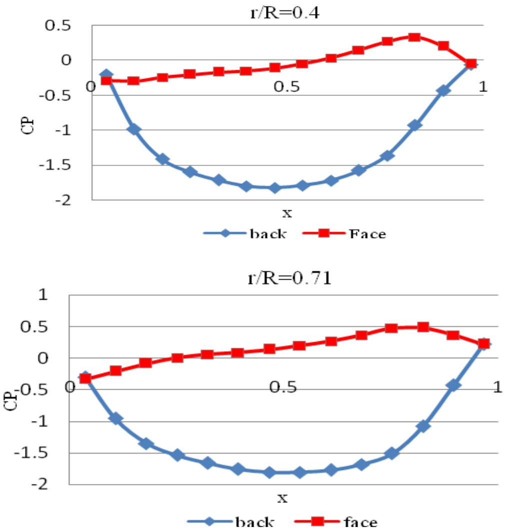
شكل (۱۹): توزيع ضريب فشار روي سطح جلوي پروانه عقب



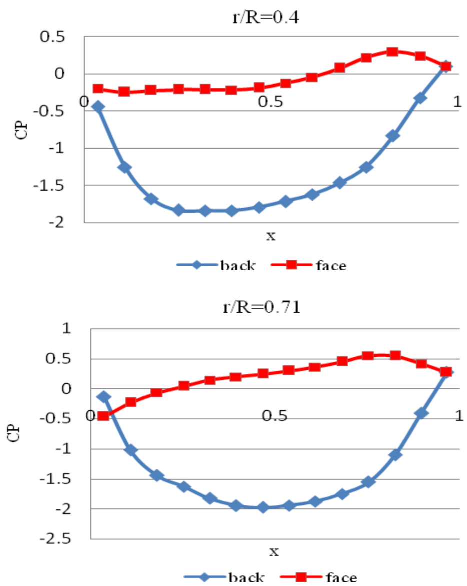
شكل (۲۰): توزيع مولفه افقي جريان القايي در فاصله بين دو پروانه $X / R = ۰٫۲۲$



شكل (۲۱): توزيع مولفه افقي جريان القايي در پشت پروانه عقب $X / R = ۰٫۳۴$



شكل (۲۲): ضريب فشار پروانه جلو در دو شعاع



شكل (۲۳): ضريب فشار پروانه عقب در دو شعاع

۴- نتيجه گيري و جمع بندي

از تحليل پروانه معكوس‌گرد 3686F-3687A مي‌توان نتايج زير را عنوان نمود:

- طبق منحني‌هاي عملكرد بدست آمده براي پروانه‌هاي جلو و عقب، شكل‌هاي (۷) و (۸) مي‌توان بيان نمود كه ضرايب هيدروديناميكي تراست و گشتاور براي پروانه عقب بيشتر از پروانه جلو است. علت اين موضوع را به استفاده پروانه عقب از انرژي القاشده توسط پروانه جلو روي آن مرتبط دانست.

- با توجه به شكل (۹)، ضرايب هيدروديناميكي پروانه معكوس‌گرد، از عوامل عملكردي هر كدام از پروانه‌هاي جلو و عقب بيشتر است. به عبارت ديگر، عملكرد هيدروديناميكي پروانه معكوس‌گرد، از برهم‌نهي عملكرد هيدروديناميكي پروانه جلو و عقب بدست مي‌آيد كه اين موضوع با نتايج تجربي نيز سازگار است.
- با توجه به شكل (۱۵)، به طور كلي، توزيع جريان گردشي مربوط به پروانه عقب، بيشتر از توزيع جريان گردشي مربوط به پروانه جلو است. بنابراين تراست توليد شده توسط پروانه عقب بيشتر از پروانه جلو است. اين موضوع را در شكل (۱۶) مي‌توان ديد.
- با توجه به شكل‌هاي (۱۷) و (۱۹)، استفاده از پروانه معكوس‌گرد موجب به حداقل رساندن گشتاورهاي توليدي توسط پروانه مي‌شود. بنابراين استفاده از اين سامانه رانش در وسايلي كه حذف حركت رولينگ اهميت دارد، مانند اژدرها، توصيه مي‌شود. همچنين، حذف گشتاور موجب عدم انتقال ارتعاشات اضافي به بدنه شناور شده، و موجب افزايش پايداري شناور مي‌شود.
- با توجه به توزيع فشار بدست آمده روي هر كدام از پروانه‌هاي جلو و عقب، شكل‌هاي (۲۰) تا (۲۳)، مي‌توان نتيجه گرفت؛ در پروانه معكوس‌گرد بار روي هر دو پروانه جلو وعقب تقسيم مي‌شود و هر يک از پروانه‌ها سهم مجزايي در توليد تراست كل دارند. لذا استفاده از اين سامانه موجب اعمال بار كمتري روي پروانه‌ها شده، و توزيع فشار يكنواخت‌تري روي پره‌ها خواهيم داشت. بنابراين احتمال وقوع پديده حبابها در پروانه‌هاي معكوس-گرد كمتر خواهد شد.
- با توجه به توزيع ميدان جريان القايي در پايين پروانه جلو و عقب، شكل‌هاي (۲۲) و (۲۳)، مي‌توان نتيجه گرفت در پايين پروانه عقب، ميدان جريان القايي يكنواخت‌تري وجود دارد. به عبارت ديگر، وجود پروانه عقب موجب دوران جريان در خلاف جهت جريان خروجي از پروانه جلو شده و باعث يكنواخت‌سازي جريان خروجي از پروانه معكوس‌گرد شده است. اين موضوع در كاهش صداي توليدي توسط پروانه معكوس‌گرد نسبت به پروانه تكي موثر است.

۵- مراجع

[۱] Cox, B. D. and Reed, A. M. “Contra-rotating propellers–design theory and application”, In Propellers/ Shafting ’88 Symposium, Virginia Beach, 1988.

[۲] 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.

[۳] 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.

[۴] 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.

[۵] Hoshino, T “Experimental and Theoretical Analysis of Propeller Shaft Forces of Contra-Rotating Propellers and Correction with Full Scale Data”, Propeller/Shafting’94 Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers Virginia Beach, USA, 1994.

[۶] Gu, H. & Kinnas, S.A. “Modeling of Contra-Rotating and Ducted Propellers via Coupling of a Vortex-Lattice with a Finite Volume Method”, Propellers/Shafting 2003 Symposium, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia Beach, USA, 2003.

[۷] Ghassemi, H. “Hydrodynamic performance of coaxial contra-rotating propeller (CCRP) for large ships,” Polish Maritime Research, Vol., 16, pp22-28, 2009.

[۸] 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.

[۹] 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.

[۱۰] Van Manen J. D. and Oosterveld M. W. C. “Model Tests on Contra-rotating Propellers”, 7th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 196 .

[۱۱] 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.

[۱۲] Carlton J. S. “Marine Propellers and Propulsion”, Second edition, Published by Elsevier Ltd., 2007.

[۱۳] Ghassemi H. “Hydrodynamic characteristics of marine propellers in steady and unsteady wake flows”, Amirkabir Journal, Vol., 14, no 54-B (Mechanical Engineering), Spring 2003.

[۱۴] 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.

۶- زیرنویس ها

---

1 Displacement ship
2 Generator line
3 Key blade
4 Rake angle
5 Skew angle
6 Kutta condition
7 Perturbation potential