

# تحلیل و عملکرد پروانه اسکيودار و تعیین قدرت رانش زیردریایی با روش المان مرزی

حسن قاسمی<sup>۱</sup>؛ مصباح سایبانی<sup>۲</sup>

## چکیده

یکی از المانهای مهم برای راندن شناورها استفاده از سیستم پیش برنده پروانه ای است. در این مقاله تحلیل و عملکرد پروانه اسکيودار و تعیین قدرت رانش برای زیردریایی با استفاده از روش عددی المان مرزی ارائه شده است. این روش برای محاسبه و تحلیل هیدرودینامیکی هیدروفویل و پروانه شناورها از کارایی مناسبی برخوردار است. در این کار تحقیقاتی، پروانه اسکيودار پنج پره ای برای زیردریایی با جابجائی ۱۲۰ تن و سرعت ۸ گره دریائی براساس فاکتورهای لازم انتخاب و تحلیل شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پروانه انتخاب شده دارای راندمان ۰/۶۵ و ۰/۶۸ بترتیب در دو شرایط سطحی و عمقی است که راندمان بالائی محسوب می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** روش المان مرزی، پروانه زیردریایی، عملکرد هیدرودینامیکی، قدرت رانش

## *Analysis of Highly Skewed Propeller and Power Prediction for the Submarine by Boundary Element Method*

Hassan Ghassemi; Mesbah Sayebani

### ABSTRACT

Propeller is one of the important marine propulsors for generating thrust to overcome the ship resistance. This paper presents the analysis of the skew propeller and propulsion for a submarine by using the Boundary Element Method (BEM). This method is useful for analysis and design of lifting bodies like hydrofoils and propellers. A five-bladed Highly Skewed Propeller (HSP) has been chosen for a submarine of 120 [Tones] with forward constant speed 8 [knots] and the calculated results of the hydrodynamic performance have been presented. The efficiency values have been obtained 0.65 and 0.68 at two surfaces and submerged conditions, respectively.

**Key words:** Boundary Element Method, Submarine propeller, Hydrodynamic performance, Propulsion

### ۱- مقدمه

متداولترین سیستم جلو برنده دریایی، سیستم شفت و پروانه است که با تولید نیروی تراست<sup>۲</sup> برای غلبه بر مقاومت (درگ) سبب راندن شناور می‌گردد. این نوع سیستم در پاشنه شناور و در پشت هیدروپلن در زیردریاییها کار می‌کند یعنی در محلی که جریان در آن بصورت ویک<sup>۱</sup> غیریکنواخت می‌باشد. این نوع هیدروپلن ها (دو هیدروپلن افقی و دو هیدروپلن عمودی) بصورت علامت باضافه  $\oplus$  در پاشنه بدنه و در جلوی پروانه نصب می‌شوند. جریان ویک ورودی به پروانه تحت تاثیر این

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۲۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۱۰/۸

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول و دانشیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: gasemi@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: mesbah2000@yahoo.com

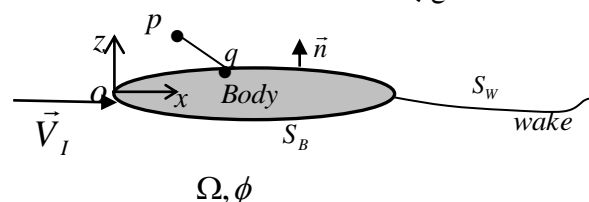
هیدرودینامیکی پروانه یک زیردریایی با ظرفیت جابجائی ۱۲۰ تنانجام گردید. این محاسبات شامل بررسی توزیع فشار و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه می‌باشد. از آنجا که فاکتورهای زیادی در انتخاب پروانه وجود دارد، اثرات این فاکتورها در تعیین ابعاد پروانه در نظر گرفته شده و با بهره گیری از مقالات، یک نوع پروانه انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفته است [۱۰] [۱۲].

## ۲- تئوری مسئله و معادلات ریاضی

دامنه  $\Omega$  با مرز  $S$  و بردار یکه  $\vec{n}$  که عمود بر مرز سطح است، مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. مرز  $S$  شامل سطح جسم  $S_B$ ، و سطح ویک دنباله ای  $S_W$  می‌باشد. فرضیات مسئله برای سیال در دامنه  $\Omega$  جریان غیر قابل تراکم، غیر ویسکوز و غیر چرخشی است و جسم در برابر سرعت جریان ورودی یکنواخت  $\vec{V}_I$  قرار دارد. با این فرضیات، میدان جریان حول جسم با سرعت پتانسیل کل  $\Phi$  و القایی  $\phi$  مشخص می‌شود که معادله لاپلاس را برآورده می‌کند:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\Phi = \phi + \vec{V}_I \cdot \vec{X}$  است.  $\vec{X}$  بردار موقعیت هر نقطه در دامنه روی سطح پروانه است.



شکل (۱): کاربرد تئوری گرین برای جسم بالابر (مثل فویل یا پروانه)

### ۲-۱- شرایط مرزی

مسأله مقدار مرزی با مشخص کردن سه دسته از شرایط مرزی روی مرز  $S$  ساخته می‌شود که عبارتند از [۹]:

(i) شرط سینماتیکی روی سطح جسم:

این شرط بیان می‌نماید که سرعت جریان عمود بر سطح جسم  $S_B$  باید صفر باشد.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{V}_I \cdot \vec{n} \quad (2)$$

که  $\vec{n}$  بردار واحد عمود به سمت خارج مرز است. سرعت جریان ورودی به پروانه بصورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$\vec{V}_I(X, Y, Z) = \vec{V}_W(X, Y, Z) + \vec{\omega} \times \vec{r}(X, Y, Z) \quad (3)$$

که در آن:

$$\vec{V}_W(X, Y, X) = V_S(1 - \vec{w}(X, Y, X)) \quad (4)$$

هیدروپلن ها می‌باشد. لذا تعامل پروانه با هیدروپلن یک موضوع مهم و در طراحی پروانه بسیار موثر و حائز اهمیت است. یکی از این تاثیرات، تعیین تعداد پره های پروانه است که باید به آن توجه شود. نکته قابل توجه دیگری، میدان جریان و یک پاشنه شناور است که بستگی زیادی به شکل بدنه دارد. بنابراین هر شناور دارای جریان ویک خاص خود می‌باشد. برای طراحان و متخصصان هیدرودینامیک، پیش بینی و محاسبات عملکرد پروانه های دریایی که در یک میدان جریان غیر یکنواخت کار می‌کنند بسیار مهم است. معیار های لازم در انتخاب پروانه بیشترین تولید تراست مورد نیاز، کمترین گشتاور، بهترین راندمان، واقع نشدن و یا کمترین احتمال وقوع کاویتاسیون<sup>۲</sup> می‌باشند [۱] [۲].

روش المان مرزی یک ابزار مناسب و قوی برای تحلیل هیدرودینامیکی پروانه شناورها است و تاکنون محققان زیادی با استفاده از این روش نتایج قابل قبولی بدست آورده اند [۴] [۲]. در این روش بر خلاف دیگر روشهای محاسباتی (اجزا محدود و یا حجم محدود)، تولید المان فقط در مرز جسم انجام می‌شود که منجر به کاهش زمان و هزینه محاسباتی می‌گردد. کاربردهای این روش علاوه بر هیدرودینامیک و مکانیک سیالات در دیگر زمینه های مهندسی از جمله مکانیک سازه ها، دینامیک و ارتعاشات می‌باشد [۵] [۶]. در سالهای اخیر، این روش بعنوان یکی از ابزارهای محاسباتی در هیدرودینامیک شناورها کاربرد زیادی داشته است و می‌تواند تا جریان در اطراف هر شکل دلخواه را تحلیل نماید. این روش برای تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی و همچنین طراحی اجسام بالابر<sup>۳</sup> مانند هیدروفویلهای<sup>۴</sup> سکان کشتی، هیدروپلن در زیردریاییها، باله هواپیماها، و مهمتر از همه پروانه های دریایی و هوایی یا ملخها بسیار ابزار مناسب و قابل قبولی بشمار می‌رود. در اینگونه اجسام شرط مرزی کاتا<sup>۵</sup> بسیار مهم است این شرط مرزی بیان می‌کند که فشار سطوح بالا و پایین در لبه انتهایی پره با هم برابرند.

با استفاده از تئوری گرین، پتانسیل سرعت در هر نقطه می‌تواند به صورت معادله انتگرالی در کل مرز بیان شود و سپس برای هر نقطه میدان پتانسیل را تعیین نمود. با استفاده از این روش می‌توان سطح پروانه و سطح ویک ورتکس دنباله ای<sup>۶</sup> (این ویک برای پروانه به شکل مارپیچی است) را به المانهای چهاروجهی تبدیل نمود و با در نظر گرفتن چشمه و دوقطبی در هر المان و حل سیستم معادلات مقدار پتانسیل و سپس نیروهای تراست و گشتاور محاسبه می‌شوند [۷] [۸].

در این مقاله با استفاده از روش المان مرزی، تحلیل

در اینجا  $S_{ij}$ ,  $D_{ij}$  و  $W_{ij}$  ضرایب موثر پتانسیل برای المان  $j$ -ام هستند که روی نقطه کنترل المان  $i$ -ام عمل می‌کنند. این ضرایب بصورت رابطه ۱۰ بیان می‌شود.

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^k \left[ \iint_{S_B} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( \frac{1}{R_{ijk}} \right) dS_j \right] \quad (10)$$

$$W_{ijl} = \sum_{k=1}^k \left[ \iint_{S_w} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( \frac{1}{R_{ijk}} \right) dS_j \right]$$

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^k \left[ \iint_{S_B} \frac{1}{R_{ijk}} dS_j \right]$$

برای بدست آوردن ضرایب یاد شده که در واقع محاسبه انتگرالها است می‌توان از روش های حل عددی انتگرالها استفاده کرد. پیچیدگی حل این انتگرالها هنگامی ظاهر می‌شود که فاصله بین المان  $i$  و المان  $j$  کوچک و یا بر هم منطبق گردد. در اینصورت این انتگرالها به انتگرالهای نامعین تبدیل می‌شوند که برای حل آنها باید از روشهای خاص استفاده نمود [۱۳]. با محاسبه این ضرایب و تشکیل فرم ماتریس سیستم معادلات مقدار  $\phi$  بدست می‌آید. در اینجا، روش گوس-سایدل برای حل دستگاه معادلات استفاده می‌شود تا مقادیر پتانسیل مجهول  $\phi$  به دست آید [۱۱].

## ۲-۴-۲- تراست، گشتاور و ضرایب هیدرودینامیکی

نیروهای تراست و گشتاور با استفاده از نیروهای فشاری و برشی وارده بر سطح محاسبه می‌شوند. مولفه فشاری از روش المان مرزی یعنی با مشتق گیری از رابطه پتانسیل (معادله ۸) بدست می‌آید. اما مولفه نیروی اصطکاکی از روش تجربی ITTC<sup>(۱)</sup> محاسبه می‌شود [۳]. بعد از مشتق گیری پتانسیل و استفاده از معادله برنولی، فشار وارده بر سطح پره بصورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود:

$$p = 0.5\rho(2\nabla\phi_{in} \cdot \nabla\phi - \nabla\phi \cdot \nabla\phi) \quad (11)$$

ضریب بی بعد فشار نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho V_i^2} \quad (12)$$

که در آن  $\rho$  دانسیته آب دریا و  $p_0$  فشار هیدرواستاتیکی است. نیروی تراست و گشتاور کل از روابط شماره ۱۳ بدست می‌آیند:

$$T = \int_S p n_x ds + T_F, \quad (13)$$

$$Q = \int_S p(n_y z - n_z y) ds + Q_F,$$

که در آن  $T_F$  و  $Q_F$  بترتیب تراست و گشتاور ناشی از ویسکوزیته سیال آب می‌باشند. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه

که در آن  $V_S$  و  $\bar{w}(X, Y, X)$  بترتیب سرعت شناور و فاکتور ویک شناور است [۹].

(ii) شرایط سینماتیکی و دینامیکی روی سطح ویک دنباله‌ای:

این شرط بیان می‌کند که هیچ اختلاف سرعت جریان القایی روی سطح ورتکس دنباله ای وجود ندارد اما اختلاف سرعت پتانسیل در این سطح وجود دارد و برابر سیرکیولاسیون  $\Gamma^\wedge$  در اطراف پره است. روابط ریاضی این دو (سرعت جریان و سرعت پتانسیل) بصورت روابط ۵ و ۶ بیان می‌شود:

$$(\Delta\phi)_{onS_w} = \phi^B - \phi^F = \Gamma \quad (5)$$

$$\left(\Delta \frac{\partial\phi}{\partial n}\right) = \left(\frac{\partial\phi}{\partial n}\right)^B - \left(\frac{\partial\phi}{\partial n}\right)^F = 0 \quad (6)$$

که B و F بترتیب سطوح عقب و جلو<sup>۱</sup> پروانه را نشان می‌دهند. (iii) شرط کاتا در لبه انتهایی پره<sup>۱</sup>

شرط کاتا، یکی از مهمترین شرط ها برای اجسام جلو بر و یا بالا بر است. در معمول ترین شکل، این شرط بیان می‌کند که سرعت سیال در لبه انتهایی محدود می‌ماند یعنی:

$$|\nabla\phi|_{T.E.} < \infty \quad (7)$$

## ۲-۴-۲- روش المان مرزی

با استفاده از تئوری گرین، جواب عمومی معادله لاپلاس بر اساس تابع گرین برای هر نقطه مانند p در دامنه  $\Omega$  می‌تواند به صورت معادله انتگرالی رابطه ۸ بیان گردد [۱۰]:

$$2\pi\phi(p) = \iint_{S_B} \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \left( \frac{1}{R(p, q)} \right) ds \quad (8)$$

$$- \iint_{S_B} \frac{\partial\phi}{\partial n} \left( \frac{1}{R(p, q)} \right) ds$$

$$+ \iint_{S_w} \Delta\phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \left( \frac{1}{R(p, q)} \right) ds$$

مقدار  $\frac{\partial\phi}{\partial n}$  در معادله یاد شده با استفاده از شرط مرزی معادله (۲) تعیین می‌شود. مقدار  $R(p; q)$  فاصله بین نقاط p و q است. لذا معادله (۸) یک معادله بر حسب تنها مجهول سرعت پتانسیل  $\phi$  است که می‌تواند محاسبه گردد.

## ۲-۳- گسسته سازی معادله و حل سیستم معادلات

روشن است که برای حل عددی معادله (۸) باید فرم معادله را بصورت گسسته تبدیل شود. عبارتی سطح مرزی جسم را به المانهای چهاروجهی تبدیل نموده و برای هر المان  $i$ -ام می‌توان رابطه شماره ۹ را برای مجهول  $\phi$  نوشت:

$$2\pi\phi_i = \sum_{j=1}^{N_{tot}} D_{ij}(\phi_j) + \sum_{j=1}^{N_{tot}} \sum_{l=1}^{N_w} W_{ijl}(\Delta\phi)_l + \sum_{j=1}^{N_{tot}} S_{ij} \left( \frac{\partial\phi}{\partial n} \right)_j, \quad (9)$$

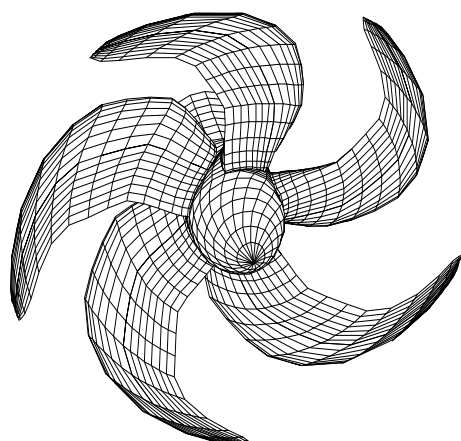
$$i = 1, 2, \dots, N_{tot}$$

$$\alpha_m = \begin{cases} 0 & \text{for } m=1 \\ \frac{(2m-1)}{2(N_R+1)} & \text{for } m=2,3,\dots,N_R+1 \end{cases} \quad (18)$$

تقسیم بندی شبکه ها در راستای کورد:

$$r_n = S(r) + \frac{C(r)}{2} (1 - \cos(\frac{\pi n}{N_C})), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_C \quad (19)$$

شبکه بندی توپی پروانه دارای سه قسمت است. قسمت بالادست، قسمت نشیمنگاه پره و قسمت پایین دست. شکل (۳) شبکه بندی سه بعدی پروانه را نشان می‌دهد. تعداد المانهای کل پروانه ۵ پره‌ای حاضر ۲۵۲۰ (تعداد المان روی پره‌ها و ۵۶۰ المان روی توپی) المان از نوع چهار وجهی است.



شکل (۳): شبکه بندی پروانه ۵ پره ای اسکیدوار HSP-5

### ۳-۲- ابعاد بدنه زیردریایی و محاسبه مقاومت

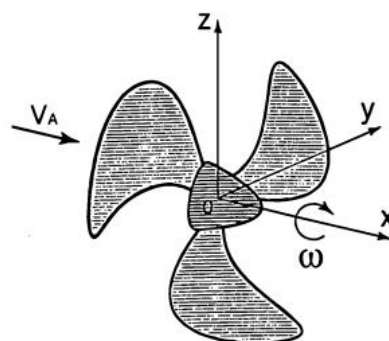
بدنه زیردریایی بطول ۲۳/۸ متر و قطر ماکزیمم ۳/۴۹۶ متر در نظر گرفته شده است. دماغه جلویی زیردریایی نزدیک به فرم بیضیگون و دماغه عقبی دوکی شکل انتخاب شده است. شکل (۴) شبکه بندی بدنه زیردریایی و پروانه را نشان می‌دهد. ابعاد اصلی آن در جدول (۱) داده شده است. مقاومت زیردریایی در دو شرایط سطحی و عمقی متفاوت است. در شرایط عمقی تنها مولفه مقاومت ویسکوز (اصطکاکی و فرم) و در شرایط سطحی علاوه بر مقاومت ویسکوز، مولفه دیگری بنام مقاومت موج سازی<sup>۱۲</sup> وجود دارد. محاسبه مقاومت شناورها کار بسیار پیچیده ای است و از حوصله این مقاله خارج است. از آنجا که در طراحی و تحلیل پروانه باید مقاومت زیردریایی مشخص باشد، در این مقاله مقاومت زیردریایی به روش تقریبی محاسبه شده است [۲]. شکل (۴) مقاومت (Rv) و قدرت موثر (Pe) زیردریایی بر حسب سرعت در شرایط غوطه وری کامل (H >> D) را نشان می‌دهد.

بصورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شوند:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta_o = \frac{J}{2\pi K_Q}, \quad J = \frac{V_A}{nD} \quad (14)$$

### ۳- روابط هندسی پروانه

پروانه در جهت خلاف عقربه ساعت با سرعت زاویه ای ثابت  $\omega (= 2\pi n)$  در جریان غیر ویسکوز، غیر قابل تراکم و غیر چرخشی با سرعت محوری یکنواخت  $V_A$  بالادست در نظر گرفته می‌شود. سیستم مختصات کارتزین  $O-xyz$  با مبدأ  $O$  در مرکز پره ثابت می‌باشد، محور  $x$  منطبق بر محور پروانه در نظر گرفته می‌شود. محور  $z$  در جهت بالا مثبت و محور  $y$  سیستم مختصات دست راست  $O-xyz$  را کامل می‌کند که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): سیستم مختصات پروانه

سپس مختصات نقطه روی سطح پره  $k$ -ام در طرف عقب و جلو به صورت رابطه ۱۵ بیان می‌شود:

$$x_{B,F} = r \tan \gamma + (S(r) + L(r)) \sin \beta_r - Y_{B,F} \cos \beta_r \quad (15)$$

$$y_{B,F} = r \cos(\eta_{B,F} + \theta_k)$$

$$z_{B,F} = r \sin(\eta_{B,F} + \theta_k)$$

که در آن:

$$\eta_{B,F} = \left[ (S(r) + L(r)) \cos \beta_r + Y_{B,F} \sin \beta_r \right] / r \quad (16)$$

$$\theta_k = 2\pi(k-1)/Z \quad k = 1, 2, \dots, Z$$

$$\beta_r = \tan^{-1} \left( \frac{P_G}{2\pi r} \right)$$

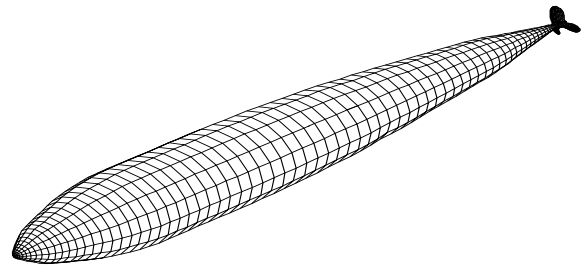
### ۳-۱- شبکه بندی پروانه

در ابتدا شبکه بندی پروانه در نظر گرفته می‌شود. تقسیم بندی شبکه ها در راستای شعاعی و در راستای طول کورد برای پره انتخاب می‌شود.

تقسیم بندی شبکه ها در راستای شعاعی:

$$r_m = \frac{1}{2}(R + r_h) - \frac{1}{2}(R - r_h) \cos \pi \alpha_m \quad (17)$$

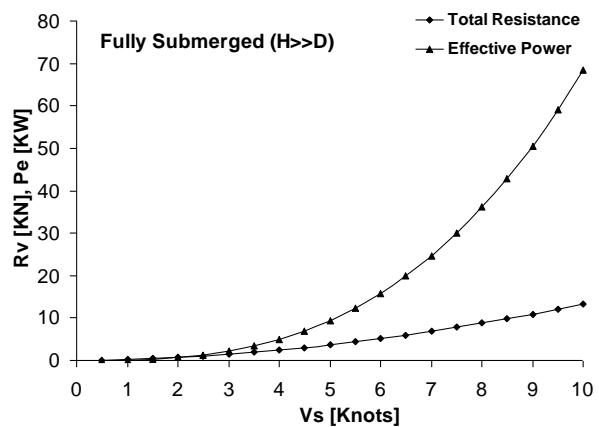
که در آن:



شکل (۴): شبکه بندی مجموعه پروانه و بدنه زیردریایی

جدول (۱): مشخصات اصلی بدنه و هیدروپلن ها

مقادیر	پارامتر
۲۳/۸۰۰	طول کل [m]
۲۱/۵۰	طول کل موثر [m]
۳/۴۹۶	قطر حداکثر [m]
۰/۹۰	طول کورد متوسط هیدروپلن استرن [m]
۰/۸۰	طول اسپن هیدروپلن پاشنه [m]
NACA0010	نوع مقطع هیدروپلن پاشنه
۱۲۰	جابجائی در حالت غوطه وری کامل [Ton]



شکل (۴): مقاومت (Rv) و قدرت موثر (Pe) زیردریایی بر حسب سرعت در شرایط غوطه وری کامل یا عمقی (H>>D)

جدول (۲): مشخصات اصلی پروانه HSP-5

نوع پروانه	
HSP-5	قطر (مقیاس کامل) [m]
۱/۴۵۵	نسبت سطح گسترش یافته
۰/۶۵	نسبت قطر به گام
متغیر	نسبت شعاع توپی به شعاع پروانه
۰/۱۵	نسبت طول کورد حداکثر به قطر
۰/۳۲	تعداد پره ها
۵	زاویه ریک [درجه]
۴/۰	زاویه اسکيو [درجه]
متغیر	مقطع پره
HSP-SRI-B	

#### ۴- فاکتورهای انتخاب پروانه زیردریایی

از نقطه نظر هیدرودینامیکی، برای طراحی پروانه چهار

معیار مهم را باید در نظر گرفت: ۱- تراست لازم برای غلبه بر مقاومت ۲- کمترین گشتاور یا کمترین قدرت دریافتی از موتور ۳- راندمان بهینه ۴- وقوع نشدن و یا کمترین احتمال وقوع کاویتاسیون. برای رسیدن به این معیارها باید ابعاد پروانه بهینه گردد. لذا، انتخاب و تعیین ابعاد اصلی پروانه بسیار مهم است. پارامترهای اصلی پروانه عبارتند از: تعداد پره ها، قطر اصلی، نسبت گام، سطح گسترش یافته (طول کورد پره)، زاویه اسکيو<sup>۱۳</sup>، زاویه ریک<sup>۱۴</sup>، مقطع و پروفیل پره [۷]. برای طراحی بهینه پروانه، همه این پارامترها باید در فرآیند تکراری مورد محاسبه و بررسی قرار گیرد تا چهار معیار یاد شده بر آورده گردد. این مقاله خلاصه ای از طرح تحقیقاتی است که همه این فرآیندها در طراحی بهینه طی شده است و در پایان به یک پروانه اسکيو دار رسیده است.

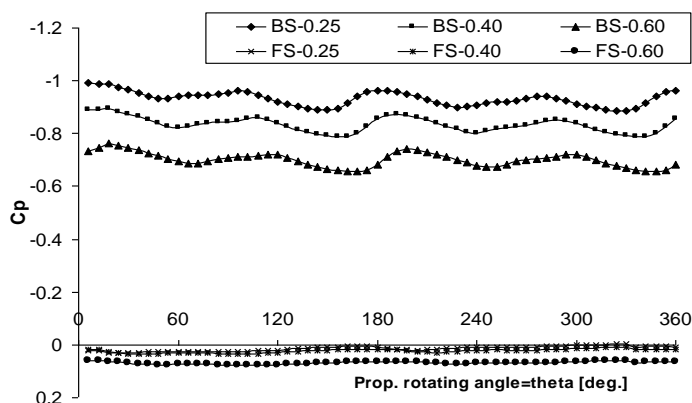
#### ۴-۱- پروانه اسکيو دار

در سالهای گذشته، استفاده از پروانه های اسکيو دار در شناورهای زیرسطحی، اژدرها<sup>۱۵</sup> و شناورهای نظامی بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است و نتایج خوبی از خود نشان داده است. [۲]. اثر اسکيو همانند زاویه سوئیپ<sup>۱۶</sup> در هیدروفویل یا باله هواپیما است. اسکيو باعث می شود که جریان سیال ورودی بطور تدریجی به پره وارد شود و از ایجاد بار ناگهانی جلوگیری شود که این امر منجر به حذف کاویتاسیون و نویز، کاهش تنش خستگی و افزایش عمر پروانه و تولید تراست و گشتاور یکنواخت می گردد. گفتنی است برای اینکه کاویتاسیون اتفاق نیفتد باید فشار تولید شده بیشتر از فشار بخار آب اشباع گردد ( $p < p_v$ ). و یا بعبارتی عدد کاویتاسیون بیشتر از ضریب بی بعد فشار شود ( $\sigma > |C_p|$ ).

#### ۴-۲- جریان ویک پاشنه

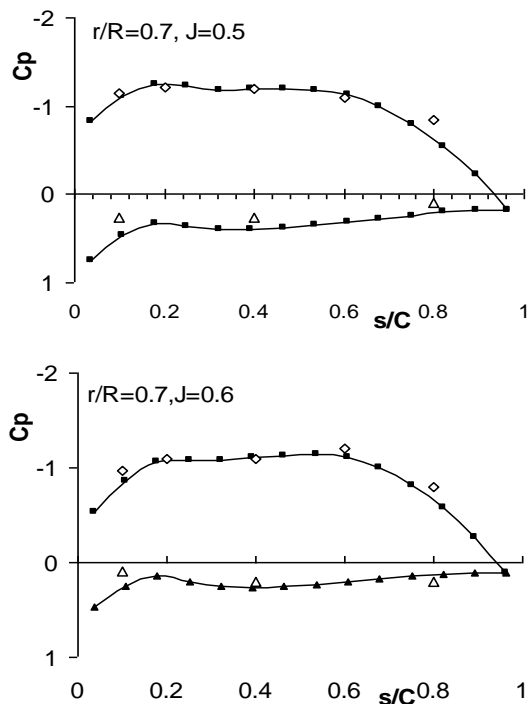
ویسکوز بودن سیال آب و ایجاد لایه مرزی و همچنین شکل و فرم بدنه (قطر بدنه اصلی، هیدروپلن ها<sup>۱۷</sup> و زاویه دم مخروطی) پارامترهایی هستند که در ایجاد ویک موثر هستند. وجود هیدروپلن باعث می شود که جریان ویک در پشت هیدروپلنها نوسانی باشد. بدنه زیردریایی حاضر دارای دو هیدروپلن عمودی و دو هیدروپلن افقی است که هیدروپلن افقی برای کنترل تریم و هیدروپلن عمودی برای مانوردهی و هدایت زیردریایی استفاده می شود. شکل (۶) کانطور جریان ویک را در جلوی پروانه در سرعت ۸ گره دریائی نشان می دهند. وجود هیدروپلن های افقی و عمودی باعث شده است که جریان ویک در عقب هیدروپلن بیشتر گردد و تاثیر آن روی پروانه دیده شود. یکی از این تاثیرات روی تعداد پره پروانه است که

جریان ویک ورودی به پروانه می‌باشد. علت این نوسانات اثر هیدروپلن‌ها بر روی جریان ویک ورودی است. وجود هیدروپلن‌های عمودی و افقی باعث می‌شود که فشار در یک سیکل دوران به تعداد هیدروپلن دامنه نوسانی داشته باشد. شکل (۸) مقایسه‌ای بین توزیع فشار محاسبه شده به روش حاضر را با نتایج تجربی (از آزمون مدل) در شعاعهای ۰/۷R و در نسبت سرعتهای مختلف (J) برابر ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۹ نشان می‌دهد. همانطوریکه در شکل (۸) دیده می‌شود نمودارهای توزیع فشار نشان می‌دهد که نتایج محاسباتی برابر خوبی با نتایج تجربی دارد [۴].



شکل (۷): توزیع فشار وارده بر سطوح پروانه HSP-5 در یک

سیکل دوران در  $J=0.6$



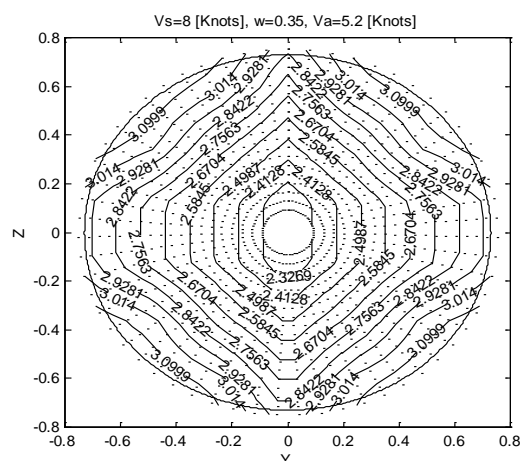
شکل (۸): مقایسه توزیع فشار بر روی پروانه HSP-5 در شرایط مختلف  $J=0.5, 0.6, 0.7, 0.90$  و در شعاع  $r/R=0.70$

نمی‌تواند ۴ پره‌ای باشد. زیرا همزمان این پره‌ها می‌تواند در مقابل جریان ویک نوسانات تراست و یا گشتاور را به همراه داشته باشند.

## ۵- بحث و بررسی نتایج

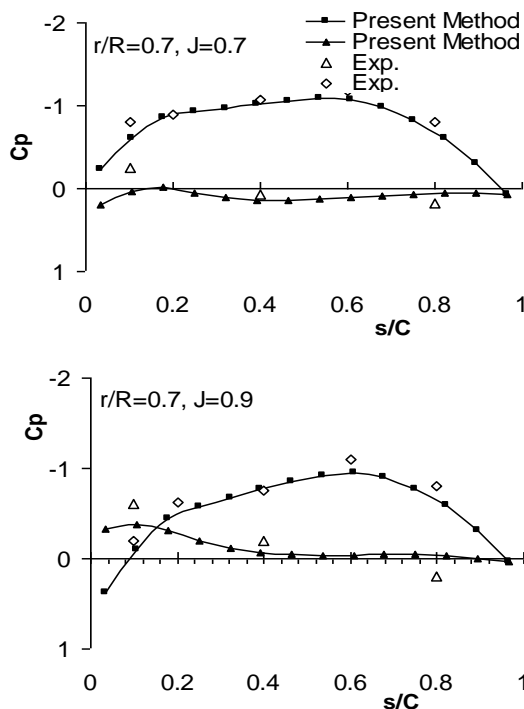
### ۵-۱- محاسبات عملکرد هیدرودینامیکی پروانه

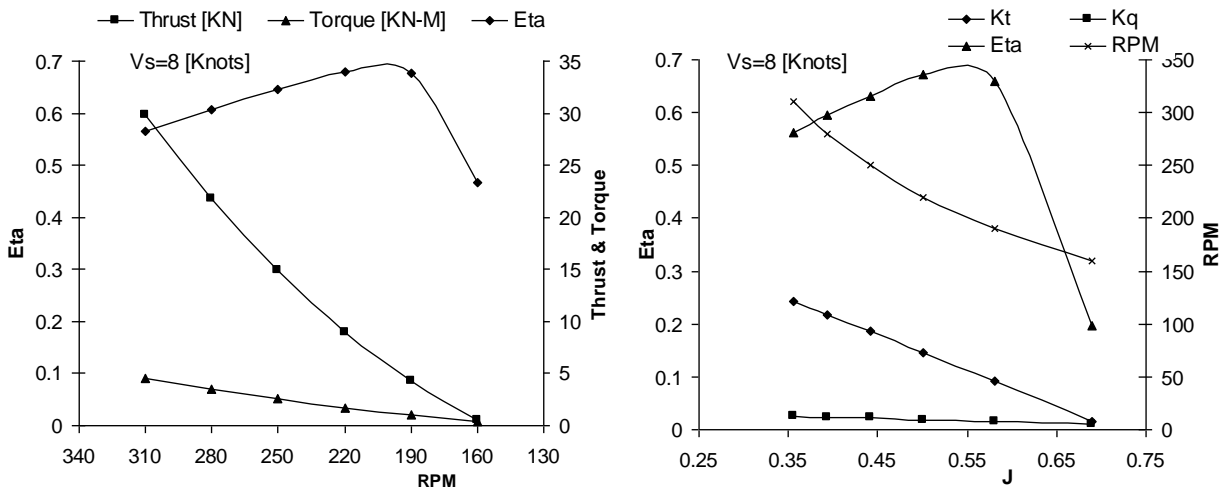
مهمترین قسمت برای درک عملکرد هیدرودینامیکی پروانه محاسبه فشار در سطوح پروانه است. با داشتن فشار، نیروی تراست و گشتاور محاسبه می‌شود. شکل (۷) توزیع فشار وارده بر سطوح پروانه HSP-5 در یک سیکل دوران در نسبت سرعت  $J=0.6$  را نشان می‌دهد. نوسانات ایجاد شده در اثر



شکل (۶): پیشگویی سرعت محوری جریان

در پاشنه





شکل (۹): عملکرد هیدرودینامیکی پروانه ۵ پره ای HSP در سرعت ۸ نات (شرایط عمقی)

پروانه طوری پیدا می‌شود تا بتواند تراست مورد نیاز شناور را جابگو باشد. مقادیر زیر در دو شرایط عمقی و سطحی بدست آمده اند که عبارتند از:  
شرایط عمقی:

$$\text{Required Thrust} = 10.3178[\text{KN}]$$

$$\text{RPM} = 227$$

$$\eta_B = 0.68$$

(For Fully Immersed Condition  $H \gg D_{Hull}$ )

شرایط سطحی:

$$\text{Required Thrust} = 12.120[\text{KN}]$$

$$\text{RPM} = 240$$

$$\eta_B = 0.65$$

(For Surface Condition  $H = D_{Hull}$ )

سپس برای سرعت های دیگر محاسبات را ادامه داده و به همین ترتیب راندمان هیدرودینامیکی در پشت شناور  $\eta_B$  و سرعت دورانی (RPM) در هر سرعت شناور بدست می‌آید. در اینجا لازم به یادآوری است که در دو شرایط عمقی و سطحی فرض شده است که دو فاکتور ویک (w) و کاهش تراست (t) یکسان می‌باشند. این فرض منطقی است زیرا پروانه در هر دو شرایط غوطه ور بوده و جریان ویک و فاکتور کاهش تراست مستقل از ارتفاع غوطه وری می‌باشند. با داشتن مقادیر تراست مورد نیاز و راندمان هیدرودینامیکی پروانه در پشت شناور، قدرت تحویلی و قدرت موتور بدست می‌آید.

در جدول (۳) محاسبات قدرت زیردریایی در دو شرایط سطحی و عمقی و در سرعت‌های ۴ و ۸ گره دریایی آمده است. گفتنی است که راندمان بدنه و راندمان کل هیدرودینامیکی پروانه از رابطه ۲۱ زیر بدست می‌آیند:

$$\text{Hull Efficiency} = \eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (21)$$

$$\text{Total Hydrodynamic Efficiency} = \eta_D = \eta_B \cdot \eta_H$$

## ۲-۵- روش تعیین قدرت رانش

روش محاسبه بدین صورت است که در سرعت مورد نظر شناور، سرعت پروانه را با استپ ۳۰ دور در دقیقه تغییر داده و عملکرد پروانه (تراست و گشتاور) بدست می‌آید. در یک سرعت دورانی زمان محاسبات با کامپیوتر ۲/۵ گیگاهرتز برای پروانه ۵ پره ای و با تعداد المانهای گفته شده نزدیک به ۲ ساعت طول می‌کشد. بنابراین، محاسبات عملکرد پروانه باید در همه سرعت های شناور (از ۱ الی ۱۰ گره دریایی با استپ یک گره) انجام شود. بنابراین در یک سرعت مشخص شناور (مانند سرعت ۶ گره) برای محاسبه عملکرد پروانه در ۶ سرعت دورانی، زمان محاسبات نزدیک به ۱۲ ساعت می‌باشد.

یک نمونه از محاسبات هیدرودینامیکی پروانه در سرعت ۸ گره دریایی را در شکل (۹) نشان داده شده است. حال باید دید که چگونه با داشتن عملکرد پروانه در شرایط حرکت عمقی و حرکت سطحی، سرعت و راندمان بهینه تعیین می‌شوند؟ برای پاسخ به این پرسش، ابتدا با استفاده از نیروی مقاومت و قدرت کل در شرایط سطحی ( $D=T$ ) و عمقی ( $H \gg D$ ) و همچنین عملکرد هیدرودینامیکی پروانه می‌توان سرعت بهینه شناور را بدست آورد. در اینجا بعنوان نمونه سرعت ۸ گره دریایی را در نظر می‌گیریم که مقاومت کل آن در شرایط عمقی برابر [KN] ۸/۷۷ و در شرایط سطحی برابر [KN] ۱۰/۳۰۲۸ است. تراست مورد نیاز (T) برای راندن شناور در شرایط عمقی در سرعت ۸ گره دریایی بصورت رابطه شماره ۲۰ محاسبه می‌شود (فاکتور کاهش تراست برابر  $t=0.15$  فرض می‌گردد).

$$T = \frac{R_T}{1-t} = \frac{8.77}{1-0.15} = 10.3178[\text{KN}] \quad (20)$$

حال با استفاده از محاسبات تراست و گشتاور و راندمان پروانه در سرعت‌های مختلف مقادیر سرعت دورانی و راندمان

جدول (۳): محاسبات قدرت زیردریایی در دو شرایط سطحی و عمقی و در سرعت‌های ۴ و ۸ گره دریائی

تخمین قدرت رانش در سرعت ۸ گره دریایی	تخمین قدرت رانش در سرعت ۴ گره دریایی
$P_E = \begin{cases} 36.0908 [KW] & \text{for Submerged} \\ 42.3972 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$	$P_E = \begin{cases} 4.9754 [KW] & \text{for Submerged} \\ 5.1464 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$
<i>Estimation of Delivered and Engine Power matched with New propeller(HSP-5)</i>	<i>Estimation of Delivered and Engine Power matched with New propeller (HSP-5)</i>
$\eta_B = 0.68$ for submerged $\eta_B = 0.65$ for Surfacing Assumed : $\eta_H = 1.307$ $\eta_{GB} = 0.95$ $\eta_S = 0.97$ $\eta_{Others} = 0.96$ $\eta_D = \eta_H \eta_B = \begin{cases} 0.886 & \text{for submerged} \\ 0.882 & \text{for Surfacing} \end{cases}$ $\eta_M = \eta_S \eta_{GB} \eta_{Others} = 0.89$ $P_D = \frac{P_E}{\eta_D} = \begin{cases} 40.73 [KW] & \text{for submerged} \\ 48.07 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$ $P_B = \frac{P_D}{\eta_M} = \begin{cases} 45.78 [KW] & \text{for submerged} \\ 54.02 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$	$\eta_B = 0.64$ for submerged $\eta_B = 0.63$ for Surfacing Assumed : $\eta_H = 1.307$ $\eta_{GB} = 0.95$ $\eta_S = 0.97$ $\eta_{Others} = 0.96$ $\eta_D = \eta_H \eta_B = \begin{cases} 0.855 & \text{for submerged} \\ 0.840 & \text{for Surfacing} \end{cases}$ $\eta_M = \eta_S \eta_{GB} \eta_{Others} = 0.89$ $P_D = \frac{P_E}{\eta_D} = \begin{cases} 5.819 [KW] & \text{for submerged} \\ 6.126 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$ $P_B = \frac{P_D}{\eta_M} = \begin{cases} 6.538 [KW] & \text{for submerged} \\ 6.884 [KW] & \text{for Surfacing} \end{cases}$

## ۶- نتیجه گیری

۲- نتایج توزیع فشار و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه پنج پره ای اسکيو دار HSP-5 نشان می دهد که اسکيو و گام مناسب شعاعی پروانه سبب ایجاد فشار یکنواخت بر روی پره ها می شود. همچنین راندمان آن نزدیک به ۶۸٪ است که نسبت به پروانه های استاندارد موجود دریائی در محدوده بالاتری است.

۳- محاسبات در دو شرایط سطحی و عمقی نشان می دهد که راندمان کل سیستم رانش در شرایط عمقی بیشتر از شرایط سطحی است.

در این مقاله روش کاربردی مهندسی برای محاسبه نیروی مقاومت و روش المان مرزی برای تحلیل و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه زیردریایی استفاده شده است بر اساس محاسبات انجام شده نتایج حاصل می گردد که عبارتند از:

۱- روش المان مرزی برای محاسبه مشخصات و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه از قابلیت مناسبی برخوردار است و این روش می تواند برای تحلیل و طراحی هیدرودینامیکی همه پروانه های دریایی صورت گیرد.

## ۷- مراجع

- [۸] Ohkusu M., "Advances in Marine Hydrodynamics, Chapter 6, Theory and Numerical Methods for the Hydrodynamic Analysis of Marine propellers", Computational Mechanics Publications, 1996, 279-322.
- [۹] Hsin C.Y., Kerwin J.E., Kinnas S.A., "A Panel Method for the Analysis of the Flow Around Highly Skewed Propellers", Proceedings of the Propellers/Shafting'91 Symposium, 1991, Virginia.
- [۱۰] Ghassemi, H. "Boundary Element Method Applied to the Cavitating Hydrofoil and Marine Propeller", International Journal of Science and Technology, Iranica Scientia, Vol. 10 (2), 2003.
- [۱۱] Ghassemi, H., Ghadimi, P.: Computational Hydrodynamic Analysis of the Propeller-Rudder and the AZIPOD Systems, Ocean Engineering , Vol. 35, No. 1, 2008.
- [۱۲] Ghassemi, H., "Effect of the Wake Flow and Skew Angle onto the Hydrodynamic Performance of Ship Propeller", Journal of Science and Technology (Scientia Iranica), Vol. 16, No. 2, 2009.
- [۱۳] Ghassemi, H., Kohansal, A.R., "Numerical evaluation of various levels of singular integrals, arising in BEM and its application in hydrofoil analysis", Applied
- [۱] Tuck, E.O., Scullen, D.C. and Lazauskas, L. "Sea Wave Pattern Evaluation", Submarine Portfolio, Australia, 2000.
- [۲] Roy Burcher, Louis Rydill "Concepts in Submarine Design", Department of Mechanical Engineering, University College London, 1994.
- [۳] Carlton, J. "Marine Propeller and Propulsion", Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.
- [۴] Ghassemi, H. "Hydrodynamic Characteristics of Marine Propeller in Steady and Unsteady Wake Flow, Journal of Science and Technology of AmirKabir, Vol.14, No. 54-B, Spring 2003.
- [۵] Banerjee P.K. and Morino L."Boundary Element Method in Nonlinear Fluid Dynamics", Textbook, Elsevier co. 1992.
- [۶] Power H. "Boundary Element Applications in Fluid Mechanics", Textbook, JohnWiely, 1995.
- [۷] Breslin J.P. and Andersen P., "Hydrodynamics of Ship Propellers", Cambridge Ocean Technology Series 3, 1994.



## ۸- علائم و اختصارات:

$C_P$ : ضریب بی بعد فشار	$Y_{B,F}$ : فاصله از سطح عقب و جلو مقطع پره تا خط کورد
$D$ : قطر پروانه	$S(r)$ : فاصله خط مولد پره تا لبه ابتدایی
$D_{Hull}$ : قطر ماکزیمم بدنه زیردریایی	$t$ : فاکتور مکش تراست
$J$ : نسبت پیشروی سرعت	$S_B$ : سطح جسم (پروانه)
$H$ : عمق غوطه وری زیردریایی	$S_W$ : سطح ویک دنباله ای پروانه
$K_T$ : ضریب تراست پروانه	$(X, Y, Z)$ : مختصات دکارتی کلی
$K_Q$ : ضریب گشتاور پروانه	$(x, y, z)$ : مختصات دکارتی محلی
$L$ : طول زیردریایی	$\vec{X}$ : بردار موقعیت هر نقطه روی سطح پروانه
$L(r)$ : فاصله خط مولد پره تا لبه انتهایی	$Z$ : تعداد پره ها
$N$ : تعداد المان های کل پروانه	$\phi$ : سرعت پتانسیل القایی
$N_C$ : تعداد المانها در راستای کورد	$\Phi$ : سرعت پتانسیل کل
$N_R$ : تعداد المانها در راستای شعاعی	$\rho$ : دانسیته سیال
$R_T$ : درگ یا مقاومت کل زیردریایی	$\vec{n}$ : بردار یکه عمود بر سطح
$r_m$ : تقسیم بندی پره در راستای شعاعی	$\Gamma$ : سیرکیولاسیون
$r_C$ : تقسیم بندی پره در راستای کورد	$\frac{\partial \phi}{\partial n}$ : مشتق سرعت پتانسیل
$r$ : مقطع شعاعی پروانه	$\omega$ : سرعت زاویه ای پروانه
$P_G$ : گام هندسی پروانه	$\eta_o$ : راندمان پروانه در شرایط آب آزاد (جریان یکنواخت)
$p$ : فشار هیدرودینامیکی	$\eta_B$ : راندمان پروانه در شرایط جریان ویک پاشنه
$p_0$ : فشار هیدرواستاتیکی	زیردریایی
$T$ : تراست پروانه	$\eta_D$ : راندمان هیدرودینامیکی پروانه
$Q$ : گشتاور پروانه	$\eta_{GB}$ : راندمان گیربکس
$V_A$ : سرعت پیشروی جریان آب	$\eta_H$ : راندمان بدنه زیردریایی
$\vec{V}_W$ : سرعت جریان ویک در پاشنه زیردریایی	$\eta_S$ : راندمان شافت
$\vec{V}_I$ : سرعت جریان ورودی به پروانه	$\eta_M$ : راندمان مکانیکی
$V_S$ : سرعت زیردریایی	$\gamma$ : زاویه ریک پروانه
$n$ : سرعت دورانی پروانه	$\beta_r$ : زاویه گام هندسی پروانه
$P_D$ : قدرت تحویلی از شافت به پروانه	$\vec{W}$ : فاکتور ویک
$P_E$ : قدرت موثر زیردریایی	$\Delta S$ : سطح المان
$P_B$ : قدرت موتور	$W_{ij}, D_{ij}, S_{ij}$ : ضرایب موثر پتانسیل
$R$ : شعاع پروانه	
$r_h$ : شعاع تویی پروانه	

## ۹- زیرنویس ها

- <sup>۱</sup> Wake
- <sup>۲</sup> Thrust
- <sup>۳</sup> Cavitation
- <sup>۴</sup> Lifting bodies
- <sup>۵</sup> Hydrofoils
- <sup>۶</sup> Kutta condition

- 
- ∨ Trailing vortex
  - ^ Circulation
  - ^ Back and face
  - ∨ Trailing edge
  - ∧ Int. Towing Tank Conf.
  - ∨ Wave-making resistance
  - ∨ Skew angle
  - ∨ Rake angle
  - ∨ Torpedos
  - ∨ Sweep angle
  - ∨ Hydroplans