

## تحلیل هیدرودینامیکی سیستم پیش برنده پروانه‌ای برای یک شناور زیرسطحی\*

حسن قاسمی<sup>(۱)</sup>محمود غیائی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** با استفاده از الگوریتم روش المان مرزی، تحلیل هیدرودینامیکی برای سیستم پیش برنده پروانه‌ای یک شناور زیرسطحی، ارائه شده است. شناورهای زیرسطحی، عموماً در دو شرایط عمقی و سطحی حرکت می‌کنند، لذا نیروی مقاوم و راندمان عملکرد شناور در این دو شرایط متفاوت است. در این مقاله، با استفاده از روش المان مرزی تحلیل هیدرودینامیکی پروانه در دو شرایط سطحی و عمقی، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. از نقطه نظر طراحان، پروانه‌ی هر شناور باید دارای نیروی محوری (تراست) لازم برای غلبه بر نیروی مقاومت آب، کمترین گشتاور و در عین حال بالاترین راندمان را داشته باشد. پروانه اسکیدوار ۵ پره‌ای برای شناور زیرسطحی انتخاب شده است. این پروانه در پاشنه‌ی شناور کار می‌کند؛ در محلی که جریان ورودی به پروانه غیریکنواخت است. با استفاده از نیروی محوری مورد نیاز در سرعت طراحی مورد نظر، ابعاد هندسی پروانه پیش‌گویی شده است. نتایج محاسبات، شامل توزیع فشار و عملکرد هیدرودینامیکی (تراست، گشتاور، راندمان) پروانه در شرایط اوپن واتر و شرایط واقعی به دست آمده است. نتایج، نشان می‌دهد راندمان پروانه در شرایط عمقی، بیشتر از شرایط سطحی می‌باشد. توزیع فشار و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه در شرایط اوپن واتر با نتایج تجربی نشان می‌دهد، نتایج محاسبات با روش حاضر رضایت بخش و مطلوب است.

**واژه‌های کلیدی** روش المان مرزی، تحلیل هیدرودینامیکی، پروانه شناور زیرسطحی، شرایط سطحی و عمقی

### Hydrodynamic Analysis of Marine Propeller for an Underwater Vehicle

H. Ghassemi

M. Ghiasi

**Abstract** An algorithm based on the Boundary Element Method (BEM) is employed to evaluate the hydrodynamic performance of the marine propeller used in an underwater vehicle (UV). Since UVs are operating at two different working conditions (surface and submerged conditions), thus the drag force and propeller performance are different. In this paper the analysis of the hydrodynamic performance at two submerged and surface conditions is presented. From the propulsor designer view point, marine propeller should provide the highest possible thrust, minimum torque and the highest efficiency. A High Skew Propeller (HSP) of 5-bladed is chosen for running the underwater vehicle. This propeller is operating at the stern of the hull, where the inflow velocity to the propeller is non-uniform. The main dimensions of the propeller are predicted based on the given required thrust and the defined operating condition. The calculation results show that the pressure and the hydrodynamic characteristics of the HSP at open water are in a good agreement with the experimental data. It is concluded that the presented method is a practical numerical tool to obtain the hydrodynamic characteristics of the propeller for the underwater vehicles.

**Key Words** Boundary Element Method, Hydrodynamic Analysis, Underwater Marine Propeller, Surface and Submerged Conditions

\* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۶/۲/۱۵ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۲/۳۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤل: دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

(۲) استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

## مقدمه

برای حرکت یک شناور زیرسطحی در یک سرعت معین، نیازمند به اعمال نیرویی هستیم که بر مقاومت هیدرودینامیکی سیال آب غلبه کند. این نیرو به وسیله سیستم پیش برنده شناور زیرسطحی تولید می شود. متداول ترین سیستم پیش برنده دریایی، سیستم پروانه ای است. پروانه از تعدادی پره تشکیل شده است که حول تویی پروانه قرار گرفته اند. مجموعه ی پروانه با حرکت دورانی شفت شناور در حال چرخش می باشند. اگر هر مقطع پره را به صورت یک فویل فرض نماییم، اختلاف فشار ایجاد شده بین دو سطح رخ و پشت پره سبب ایجاد نیرویی محوری می گردد که باعث حرکت شناور می شود. چنانچه پروانه با سیالی با سرعت محوری ( $V_A$ ) و با سرعت زاویه ای ثابت ( $\omega = 2\pi n$ ) برخورد نماید، نیروی محوری ( $T$ ) و یا توان ( $P_T = TV_A$ ) را ایجاد می کند در حالی که توان مصرفی (توان داده شده به پروانه) برابر حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه ای است ( $P_D = \omega Q$ ). معیارهای مهم در انتخاب پروانه، بیشترین تولید نیروی محوری، کمترین گشتاور، راندمان بهینه و عدم و یا کمترین احتمال وقوع کاویتاسیون می باشند [۱].

جهت دستیابی به منحنی عملکردی پروانه، مدل پروانه در تونل کاویتاسیون تست می شود. این گونه تست ها علاوه بر زمان و هزینه ی زیاد، نیازمند دسترسی به تونل کاویتاسیون می باشد. یک روش جایگزین، استفاده از روش های عددی است. تدوین روش های تئوری تحلیل عملکرد پروانه ها از قرن نوزدهم شروع شده و توسعه پیدا کرده است. شاید بتوان از تئوری مومتم رانکین، به عنوان پایه و اساس سایر تئوری ها نام برد [۲]. پس از آن، تئوری های همانند تئوری المان پره که تکمیل کننده ی تئوری مومتم بوده است، مطرح شدند. تئوری های مدرن سال های اخیر، بیشتر بر مبنای آئرو دینامیک بوده و افرادی چون

لانچستر، کاتا، ژوکفسکی، مانک و پرائتل در این زمینه فعالیت نموده و تئوری های را مطرح کرده اند. از سال ۱۹۵۰، این تئوری ها برای پروانه و سکان کشتی ها استفاده شده است و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه دریایی توسط بوریل و لربز، توسعه یافته است. به علت پیچیده بودن هندسه پروانه های دریایی، استفاده از تئوری های دوبعدی خطاهایی در محاسبات وارد می کند. جهت رفع این خطاها می بایست از تئوری های سه بعدی استفاده کرد. مهم ترین تئوری های سه بعدی ارائه شده در خصوص تحلیل هیدرودینامیکی پروانه، تئوری سطوح بالابر (Lifting Surface Theory) و روش المان مرزی (Boundary Element Method) است.

در سال های اخیر، دو کتاب مرجع مناسب برای هیدرودینامیک پیش برنده های دریایی، توسط برسلین و اندرسن [3] و کارلتون [4] نوشته شده است که برای دانشجویان مهندسی دریا استفاده می شود. در کتاب برسلین و اندرسن، کلیه ی روش ها و تئوری های هیدرودینامیکی پروانه بیان شده است. در کتاب کارلتون، همه ی مسائل مرتبط با طراحی پروانه (هیدرودینامیکی، سازه ای، ارتعاشاتی، آکوستیکی، مواد و ساخت) تشریح شده است. طراحی پروانه از نظر محاسبات هیدرودینامیکی، مهم ترین مسائل طراحان آرشیکت دریا (Naval Architect) به شمار می رود و در کتاب کارلتون بیش از ۶۰٪ مباحث، مربوط به روش های طراحی و محاسبات هیدرودینامیکی می باشد. کلیه ی تئوری های هیدرودینامیکی هیدروفویل و پروانه در فصول ۷-۸ کتاب کارلتون به طور کامل تشریح شده و روش المان مرزی به عنوان یک روش قدرتمند برای محاسبات، تحلیل و طراحی پروانه مطرح شده است.

در روش المان مرزی، دو پارامتر هندسه المان و کمیت المان، خیلی مهم است. اگر کمیت در هر المان ثابت و خطی باشد، المان مرزی مرتبه پایین (Lower

پروانه با هیدروپلن یک موضوع مهم و حائز اهمیت در تحلیل و طراحی پروانه است. یکی از این تأثیرات تعیین تعداد پره‌های پروانه است که باید به آن توجه شود. نکته‌ی دیگری که باید به آن توجه نمود، میدان جریان و یک پاشنه شناور است که بستگی زیادی به شکل بدنه دارد [12-14]. فلیس و همکارانش [14] اثرات و یک پاشنه زیردریایی روی پروانه را با روش‌های محاسباتی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. محاسبه‌ی جریان و فاکتور و یک شناورها با استفاده از روش‌های تجربی نیز توسط بوچر و رایدیل [12] بررسی شده و فرمول‌هایی را ارائه دادند. اثرات زاویه اسکيو و جریان و یک روی پروانه‌ی کشتی توسط هسین و همکاران [11] و مؤلف مقاله‌ی حاضر [16] با استفاده از روش المان مرزی انجام شده است.

با استفاده از روش المان مرزی، سطوح پروانه و ورتکس دنباله‌ای (Trainling Vortex Wake) (که برای پروانه به شکل مارپیچی است) با المان‌های چهار وجهی هذلولوی (Hyperboloidal Panels) تولید می‌شود و با در نظر گرفتن چشمه و دوقطبی در هر المان و حل سیستم معادلات مقدار پتانسیل و فشار به دست می‌آید، سپس نیروی محوری و گشتاور کل پروانه محاسبه می‌گردد.

مراحل و وظایف اصلی این روش، عبارت از ایجاد شبکه (تولید المان)، محاسبه ضرائب تأثیر تکنه‌های چشمه و دوقطبی در هر المان، حل معادلات همزمان برای مقاومت‌های تکنه‌ی مجهول و تعیین سرعت‌های محلی، فشارها، نیروها و گشتاورهای کل می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش المان مرزی تحلیل هیدرودینامیکی پروانه برای شناور زیرسطحی با ظرفیت جابه‌جائی ۱۲۰ تن انجام شده است. این محاسبات، شامل توزیع فشار و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه می‌باشد. از آن جا که فاکتورهای زیادی در انتخاب پروانه وجود دارد، اثرات این فاکتورها در تعیین ابعادی پروانه، مورد تحلیل قرار

order BEM) و اگر کمیت در هر المان از مرتبه دو و یا بالاتر باشد، المان مرزی مرتبه‌ی بالا (Higher order BEM) می‌گوییم [5-7]. برای اجسام سه بعدی استفاده از روش المان مرزی مرتبه‌ی بالا بسیار مشکل است. در این مقاله از المان‌های مرتبه‌ی پایین استفاده شده است. سطح پروانه به المان‌های سه و یا چهارضلعی تقسیم شده که دارای توزیع ثابتی از چشمه و دو قطبی هستند. امروزه با کمک روش المان مرزی می‌توان جریان در اطراف هر شکل دلخواه را تحلیل نمود؛ لذا این روش به عنوان یک ابزار مناسب محاسباتی برای تحلیل‌های هیدرودینامیکی شناورها شناخته شده است. یکی از موارد کاربردی این روش، استفاده از آن در تحلیل و طراحی اجسام بالابرنده است و یک ابزار مناسب و قوی برای تحلیل هیدرودینامیکی پروانه شناورها بوده و تا به حال محققان زیادی با استفاده از این روش، نتایج قابل قبولی به دست آورده‌اند [7-10]. در همه این مراجع، استفاده از روش المان مرزی بر اساس تئوری پتانسیل برای محاسبات هیدرودینامیکی پروانه شناورها به کار گرفته شده است. در روش المان مرزی بر خلاف روش‌های دیگر محاسباتی (اجزا محدود و یا حجم محدود)، شبکه بندی بر روی مرزهای مدل، صورت می‌پذیرد و در هر نقطه می‌توان پتانسیل سرعت را بر اساس تئوری گرین به صورت معادله‌ی انتگرالی در کل مرز بیان کرد و سپس برای هر نقطه، میدان پتانسیل را تعیین نمود. در نتیجه در این روش اصلاح و یا تغییر شبکه کار راحت تری است. این کار سبب آسان شدن مدل‌سازی عددی و کاهش زمان و هزینه‌ی محاسباتی می‌گردد.

در شناورهای زیرسطحی، به علت نصب پروانه در پاشنه‌ی شناور و در پشت هیدروپلن، جریان و یک (Wake) ورودی به پروانه، غیریکنواخت است. این نوع هیدروپلن‌ها (دو هیدروپلن افقی و دو هیدروپلن عمودی) به صورت علامت باضافه (+) در پاشنه بدنه و در جلوی پروانه نصب می‌شوند؛ لذا عکس العمل

که  $\vec{n}$  بردار واحد عمود به سمت خارج مرز است. سرعت جریان ورودی به پروانه به صورت زیر بیان می شود:

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

که:

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

که در آن  $V_S$ ، سرعت شناور و  $\bar{w}(X, Y, X)$ ؛ فاکتور ویک (Wake Factor) شناور است.

**شرایط سینماتیکی و دینامیکی در دنباله:** هیچ پرش سرعت جریان روی سطح ورتکس دنباله وجود ندارد، اما پرش سرعت پتانسیل در این سطح وجود دارد و برابر سیرکولاسیون  $\Gamma$  در اطراف پره است. رابطه‌ی بین سرعت جریان و سرعت پتانسیل به صورت زیر بیان می شود:

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

و

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

که  $B$  و  $F$  سطوح پشت و جلوی پروانه را نشان می دهند.

**شرط کاتا در لبه‌ی فرار (Trailing edge):** این شرط یکی از مهم ترین شرطها برای اجسام پیش برنده و یا بالابرنده است. این شرط، بیان می کند که سرعت سیال در لبه فرار ثابت می ماند یعنی:

$$|\nabla\phi|_{T.E.} < 0 \quad (7)$$

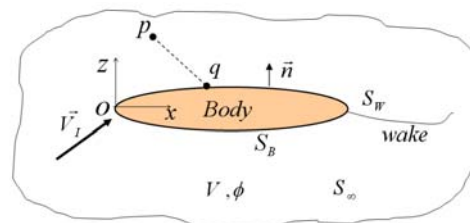
با استفاده از تئوری گرین (Green's function)، پتانسیل سرعت مغشوش در هر نقطه میدان می تواند به صورت معادله‌ی انتگرالی بر حسب توزیع چشمه و دوقطبی نوشته شود؛ بنابراین، برای نقطه‌ی میدان  $P$  در  $V$  داریم [8]:

گرفته است. این مقاله به پنج بخش مهم تقسیم بندی شده است. بعد از مقدمه؛ معادلات حاکم و شرایط مرزی؛ فرمولاسیون پروانه و تولید المان تشریح شده است. در بخش بعد فاکتورها و چگونگی انتخاب پروانه و همچنین، تحلیل هیدرودینامیکی و به کارگیری روش های عددی و نتایج محاسباتی، مورد ارزیابی قرار گرفته و در پایان به نتیجه‌ی مقاله اشاره شده است.

### معادلات حاکم و شرایط مرزی

ناحیه‌ی بسته  $V$  را مطابق شکل (۱) با مرز  $S$  و بردار واحد  $\vec{n}$  عمود بر  $S$  در نظر بگیرید. مرز  $S$  ناحیه‌ی جریان، شامل سطح جسم؛  $S_B$  و سطح ویک؛  $S_W$  می باشد. با این فرض که سیال در  $V$  غیر قابل تراکم، غیر ویسکوز و غیر چرخشی است،  $V$  در مقابل سرعت جریان ورودی یکنواخت  $\vec{V}_I$  در بالادست جریان قرار می گیرد. با این فرضیات، میدان جریان حول جسم با پتانسیل سرعت جزئی  $\phi$  مشخص می شود که معادله‌ی لاپلاس را ارضا می کند:

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



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

مسئله مقدار مرزی با مشخص کردن سه شرط مرزی روی مرز  $S$  به صورت زیر ساخته می شود [4]:

**شرط مماس روی سطح خیس شده:** شرط مرزی جنبشی این است که سرعت جریان عمود بر سطح جسم  $S_B$  باید صفر باشد و:

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

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

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

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

برای به دست آوردن ضرایب فوق که در واقع محاسبه انتگرال هاست، از روش‌های عددی و تحلیلی استفاده شده است [17,18]. با محاسبات این ضرایب و تشکیل فرم ماتریس، سیستم معادلات مقدار  $\phi$  به دست می‌آید. این سیستم معادلات به فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[D][\phi] = [S] + [W][\Delta\phi] \quad (11)$$

که:

[D] = ماتریس ضرائب تأثیر پتانسیل دوقطبی

[S] = ماتریس ضرائب تأثیر پتانسیل چشمه

[W] = ماتریس ضرائب تأثیر پتانسیل دوقطبی

پتانسیل‌های سرعت جزئی مجهول و پرش پتانسیلی

مجهول (یا ناپیوستگی) در لبه فرار پره  $[\phi], [\Delta\phi]$

در محاسبات عددی عملی، ایجاد ماتریسهای [D], [S]

و [W] مستلزم ارزیابی  $D_{ij}, W_{ijl}, S_{ij}$  می‌باشد. این

فرآیند، بسیار وقت‌گیر است. [D] ماتریس بزرگی است

و حل معادله‌ی (۱۱)، نیازمند تلاش زیادی است؛

بخصوص در زمانی که تعداد المان‌ها زیاد است. روش

گوس-سیدل (Gauss-Seidel) برای حل سیستم معادله

انتخاب شده تا مقادیر پتانسیل مجهول  $\phi_j$  به دست آید

[10].

### اعمال شرط کاتا

تئوری شرط کاتا می‌گوید که سرعت در امتداد لبه فرار

محدود باقی خواهد ماند. به عنوان یک فرم معادل

دیگر، می‌توان فهمید که فشار مساوی در سطوح بالایی

و پایینی لبه فرار وجود دارد. این شرط کاتای فشار

برابری برای تعیین  $\Delta\phi_j$  مجهول مقاومت دوقطبی برای

$$4\pi\phi(P) = \iint_{S_B} \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} ds \quad (8)$$

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

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

این معادله می‌تواند به عنوان نمایش پتانسیل

سرعت بر حسب توزیع دوقطبی با مقاومت  $\phi$  روی

سطح جسم  $S_B$ ، توزیع مقاومت چشمه  $\partial\phi/\partial n$  روی

$S_B$  و توزیع دوقطبی از مقاومت  $\Delta\phi$  روی سطح دنباله،

$S_w$  در نظر گرفته شود. حل مسأله مقدار مرزی شامل

تعیین مقاومت‌های تکینه‌های مقاومت (Strength)

(Singularities) که نشان‌دهنده‌ی ورتکس دنباله‌ای

پروانه و لبه‌ی فرار است؛ به طوری که معادله انتگرالی

(۸) را ارضا کند، می‌باشد. توزیع پیوسته‌ی تکینه‌های

روی سطح پروانه و دنباله روی المان‌های چهاروجهی،

تقریب زده می‌شود. از آن جا که مقاومت‌های چشمه‌ها

با شرایط مرزی جنبشی (۲) توصیف شد، تنها

مقاومت‌های دوقطبی مجهول هستند و باید تعیین شوند.

برای پروانه با تعداد پره‌های (Z)، نقاط میدان

روی المان‌های سطح پره انتخاب شده (پره کلیدی) و

قطعه‌ی بین پره‌ای هاب (Hub) توزیع می‌شود. اثرات

موقعیت‌های دیگر پره‌ها و هاب، با جمع کردن ضرائب

تأثیر محاسبه شده توسط چرخش نقاط کنترل و

زاویه  $\frac{2\pi}{Z}$  حول محور پروانه تا زمانی که تمام پره‌ها

حساب شوند، در نظر گرفته شده‌اند. این مطلب، معادل

با داشتن المان‌بندی مشابه روی همه‌ی پره‌هاست.

گسسته سازی معادله‌ی (۸) منجر به سیستم معادله‌ی

جبری خطی برای  $\phi$  مجهول به صورت زیر می‌شود:

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

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

$S_{ij}^K$  و  $W_{ij}^K, D_{ij}^K$ ، ضرایب دوقطبی و چشمه

برای المان  $j$  هستند که روی نقطه کنترل المان  $i$  عمل

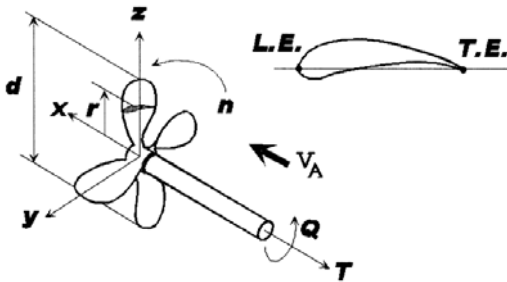
می‌کنند. این ضرایب به صورت زیر بیان می‌شود:

سپس مختصات نقطه روی سطح پره  $k$ -ام در طرف عقب و جلو (Back & Face) به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} x_{B,F} &= r \tan \gamma + (S(r) + L(r)) \sin \beta_G - Y_{B,F} \cos \beta_G \\ y_{B,F} &= r \cos(\eta_{B,F} + \theta_k) \\ z_{B,F} &= r \sin(\eta_{B,F} + \theta_k) \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \eta_{B,F} &= [(S(r) + L(r)) \cos \beta_G + Y_{B,F} \sin \beta_G] / r \\ \theta_k &= 2\pi(k-1)/Z \quad k=1,2,\dots,Z \\ \beta_G &= \tan^{-1} \left( \frac{P_G}{2\pi r} \right) \end{aligned} \quad (14)$$



شکل ۲ سیستم مختصات دکارتی پروانه و مقطع پره در شعاع  $r$

### نیروی محوری و گشتاور و ضرایب هیدرودینامیکی

نیروی محوری و گشتاور کل روی پروانه با دو مولفه فشاری و اصطکاکی به صورت زیر بیان می شوند:

$$\begin{aligned} T &= Z \sum_{i=1}^N p(P_i) n_{xi} \Delta S_i - T_F \\ Q &= Z \sum_{i=1}^N p(P_i) (n_{yi} z_i - n_{zi} y_i) \Delta S_i + Q_F \end{aligned} \quad (15)$$

ضریب اصطکاکی  $C_f$ ، برای مؤلفه اصطکاکی نیروی محوری  $T_F$  و گشتاور  $Q_F$  پروانه می تواند با فرمول پرائنتل - شلیختینگ (Prantle-Schlichting) بیان شود

سطح و یک دنباله ای به کار خواهد رفت. در محاسبات عددی، شرط کاتای فشار می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta p_i = p_{TE}^U(P_j) - p_{TE}^L(P_j) = 0 \quad \text{for } j=1,2,\dots,N_R \quad (12)$$

برای ارضا نمودن شرط کاتا باید معادلات (۹) و (۱۲) به صورت همزمان حل شود؛ چون با توجه به داشتن مشخصه غیرخطی این معادلات، حل آن مشکل می باشد که نیاز به یک حلقه تکراری است [11].

### محاسبه توزیع سرعت و فشار روی سطوح جسم

سرعت جریان در سطح می تواند با دو روش به دست آید:

- ۱- روش مشتق گیری عددی از پتانسیل سرعت،
  - ۲- روش مستقیم از مشتق معادله گرین.
- روش دوم به خوبی روش اول نیست؛ زیرا ضرائب تأثیر سرعت جریان در مشتق معادله گرین که مشتق چشمه و دوقطبی هستند، نسبت به موقعیت نقطه‌ای کنترل درون هر المان حساس تر هستند و نتایج خوبی ارائه نمی دهند. در این جا روش اولی برای محاسبه توزیع های سرعت و فشار روی سطح جسم به کار می رود [8].

### فرمولاسیون پروانه

سیستم مختصات کارتزین  $O-xyz$  با مبدأ  $O$  در مرکز پره، محور  $x$ ، منطبق بر محور پروانه و جهت آن به سمت پایین دست در نظر گرفته می شود. محور  $z$ ، در جهت بالا مثبت است و بر خط مولد پره کلیدی پروانه منطبق است. محور  $y$ ، سیستم مختصات راست دست  $O-xyz$  را کامل می کند که در شکل (۲) نشان داده شده است. جریان حول پروانه جریانی غیرقابل تراکم، غیر ویسکوز و غیرچرخشی با سرعت محوری یکنواخت  $V_A$  بالادست در نظر گرفته می شود. جهت چرخش پروانه در جهت خلاف عقربه های ساعت با سرعت زاویه ای ثابت  $\omega$  فرض گردیده است.

[12]:

$$C_f(j) = \left(1 + \frac{t_{\max}(j)}{C(j)}\right) \cdot \frac{0.455}{(\text{Log}_{10} R_e)^{2.58}} \quad (16)$$

که  $R_e$  عدد رینولدز است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_e = \frac{V_I(j) \cdot C(j)}{\nu} \quad (17)$$

که در آن  $C(j)$ ، طول وتر پروانه در  $0.7R$  است.

در نهایت، ضرایب هیدرودینامیکی پروانه

می‌توانند به صورت زیر تعیین شوند:

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad ; \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (18)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad ; \quad \eta = \frac{J K_T}{2\pi K_Q}$$

زبر، از سطح روی نتایج توزیع فشار اثر می‌گذارد؛ بنابراین نیاز است تا سطوح، صاف و هموار با میانمایی دقیق برای مختصات پروانه باشند. در این مورد، سطوح پروانه و دنباله به تعدادی المان‌های چهار ضلعی هذلولوی کوچک تقسیم می‌شوند. در ابتدا المان‌بندی پره‌ی پروانه در نظر گرفته می‌شود. تقسیم بندی المان‌ها در جهت شعاعی و در جهت وتر برای پره انتخاب می‌شود [16].

در توزیع شعاعی:

$$r_B = \frac{1}{2}(R + r_h) - \frac{1}{2}(R - r_h) \cos \alpha_m \quad (19)$$

در توزیع در جهت وتر:

$$C_B = S(r) + \frac{C(r)}{2} (1 - \cos(\frac{\pi n}{N_C})), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_C \quad (20)$$

که در آن:

$$\alpha_m = \begin{cases} 0 & \text{for } m=1 \\ \frac{(2m-1)}{2(N_R+1)} & \text{for } m=2, 3, \dots, N_R+1 \end{cases} \quad (21)$$

المان بندی هاب نیز باید صورت گیرد. هاب به شکل استوانه‌ای و بیضی‌گون است. در تقاطع پره‌ها با هاب باید دقت نمود که المان‌های هاب با المان‌های پره به صورت منظم منطبق گردد.

### تولید المان بدنه شناور

جدول (۱) مشخصات اصلی ابعاد بدنه و هیدروپلن را نشان می‌دهد. فرم بدنه‌ی اصلی را در تعداد زیادی نقطه در جهت طولی با مقیاس واقعی اندازه گیری نموده و به عنوان ورودی، وارد برنامه‌ی کامپیوتری اعمال می‌کنیم. سپس بدنه اصلی بکمک برنامه با روش درون یابی اسپلاین (Spline Interpolation) و با تقسیمات کسینوسی در جهت طولی، المان بندی می‌کنیم. در برنامه‌ی کامپیوتری، تمامی المان‌بندی‌ها کاملاً با استفاده از روابط ریاضی و درون یابی اسپلاین انجام می‌شود و مختصات هر المان به صورت دقیق به دست می‌آید. المان سطحی تولید شده برای مجموعه بدنه و پروانه

### المان بندی پروانه و بدنه

برای به دست آوردن راه حل عددی برای معادله انتگرالی، سطح پره‌های پروانه، هاب و سطح ورتکس دنباله ای به تعدادی المان‌های کوچک تقسیم می‌شوند. در کاربردهای قبلی روش المان مرزی برای پروانه، المان‌های چهاروجهی صفحه‌ای برای تقریب سطح استفاده می‌شد، اما چون پره پروانه دارای سطوح حلزونی غیرصفحه‌ای است، لذا المان‌های صفحه‌ای سبب ایجاد فاصله در گوشه المان و در نتیجه ایجاد خطاهای عددی می‌شوند. برای به دست آوردن سطح بسته و پیشگیری از چنین خطاهای عددی از المان‌های چهاروجهی هذلولوی استفاده می‌شود. به طور کلی، نوع المان و تولید المان صاف، یکی از مهم‌ترین بخش‌های این روش است؛ اگر چه در همه‌ی روش‌های محاسبات عددی، نوع المان و تولید المان خیلی مهم می‌باشد و در نتایج محاسبات اثر مستقیم دارد؛ یعنی ممکن است قسمت حل کننده خوب عمل کند، ولی تولید شبکه نامناسب سبب خطا در نتایج محاسبات می‌شود. تولید المان پروانه به سه قسمت پره، هاب و ورتکس‌های دنباله ای تقسیم می‌شود.

تولید المان و سطوح صاف (بدون اعوجاج) در روش المان مرزی بسیار مهم است و در نتایج محاسباتی تأثیر زیادی دارد. هرگونه المان ناهموار و

در شکل (۳) نشان داده شده است و:

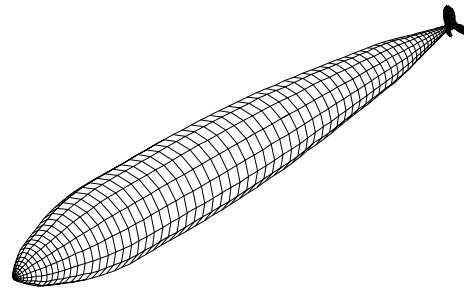
### فاکتورهای انتخاب پروانه

اولین گام برای تحلیل پروانه، محاسبه‌ی نیروی مقاوم (پسا) و یا نیروی محوری لازم برای غلبه بر درگ پسا است. در این جا، با استفاده از روش تجربی مقاومت شناور استفاده می‌گردد [2] و نیروی پسا کل و قدرت موثر کل شناور در دو حالت سطحی و عمقی

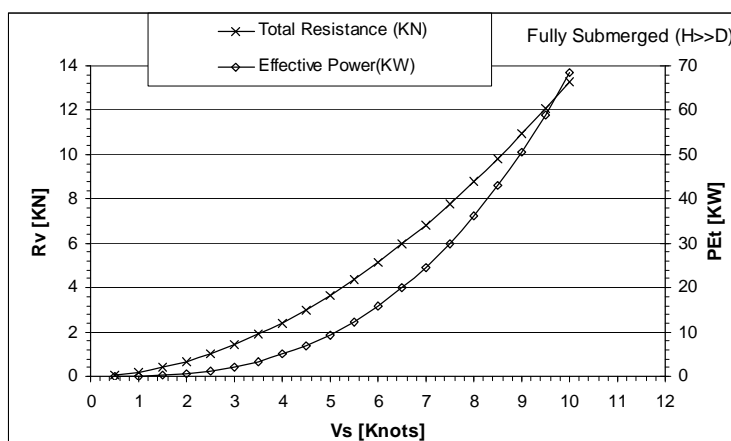
(غوطه وری کامل) در سرعت‌های مختلف از ۱ الی ۱۰ گره دریائی محاسبه شد که در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای هر کدام از نیروی مقاوم و قدرت محورها عمودی در این شکل‌ها در دو مقیاس جداگانه (دو محور عمودی) رسم شده‌اند؛ لذا شکل ظاهری با هم تلاقی نمودند که در واقع این طور نیست  $(P_{Et} = R_t \cdot V_s)$ . سپس برای حدس و تعیین پارامترهای پروانه، باید اثرات هر کدام از آن‌ها را مورد بررسی قرار دهیم. پارامترهای اصلی پروانه عبارتند از: تعداد پره‌ها، قطر اصلی، نسبت گام، سطح گسترش یافته (طول کورد پره)، زاویه اسکیو (Skew angle)، زاویه‌ی ریک (Rake angle)، مقطع و پروفیل پره [4].

جدول ۱ مشخصات اصلی بدنه و هیدروپلن‌ها

پارامتر	مقدار
طول کل [m]	23.800
طول کل موثر [m]	21.50
قطر ماکزیمم [m]	3.496
طول کورد متوسط هیدروپلن استرن [m]	0.90
طول اسپن هیدروپلن استرن [m]	0.80
نوع مقطع هیدروپلن استرن	NACA0010
جابجائی در حالت غوطه وری کامل [Ton]	120

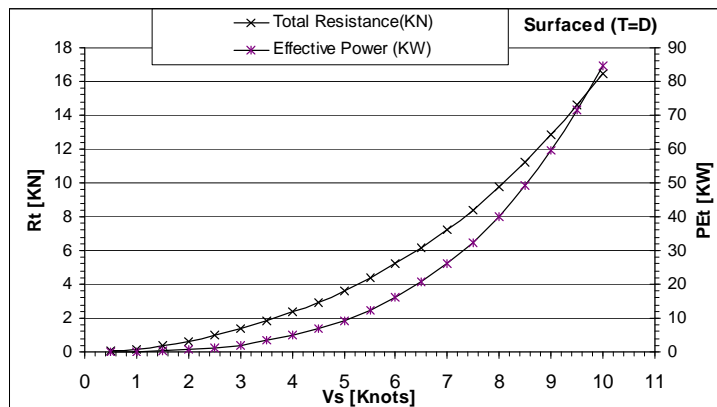


شکل ۳ المان بندی مجموعه پروانه و بدنه



شکل ۴ محاسبه‌ی نیروی پسا و قدرت کل در شرایط عمقی ( $H \gg D$ )





شکل ۵ محاسبه‌ی نیروی پسا و قدرت کل در شرایط سطحی (D=T)

هیدروفویل، سکان و باله‌ی هواپیماست و این بدان معنی است که زاویه‌ای با جهت جریان، ایجاد نموده تا جریان ورودی به جسم به صورت تدریجی اعمال گردد. شکل‌های (۶) و (۷) دو نمونه از پروانه‌های سه پره‌ای و پنج پره‌ای به ترتیب بدون اسکيو و اسکيو دار را نشان می‌دهند. مزایای اسکيو عبارتند از: حذف کاویتاسیون و جلوگیری از ایجاد فشار نوسانی و بار ناگهانی بر روی پره، ایجاد تدریجی جریان آب ورودی به لبه‌ی جلویی، کاهش تنش خستگی و افزایش عمر پروانه، تولید نیروی محوری و گشتاور یکنواخت و بدون نوسان.

با توجه به مزایای فوق، زاویه‌ی اسکيو در پروانه شناور زیرسطحی بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر با افزایش اسکيو، راندمان قدری کاهش می‌یابد، ولی مزایای مثبت آن بیشتر از کاهش راندمان است؛ لذا، امروزه سعی می‌شود در طراحی پروانه، زاویه اسکيو را تا آن جا که امکان دارد، افزایش داد. تعیین زاویه‌ی اسکيو بر اساس پروانه‌های مختلفی نشان می‌دهد که زاویه‌ی اسکيو بین ۴۰ تا ۵۰ درجه، ایده‌آل است [14]. تغییرات شعاعی زاویه‌ی اسکيو در شکل (۹) نشان داده شده است. در این مقاله، پروانه‌ی اسکيو دار (Highly Skewed Propeller) را HSP-5 می‌نامیم.

### اثر تعداد پرها

به طور معمول، تعداد پره‌های پروانه شناورها بین ۳ تا ۷ پره است ( $3 \leq Z \leq 7$ ). تعداد پرها در شناور زیرسطحی با داشتن چهار هیدروپلن (دو تا افقی و دو تا عمودی) نمی‌تواند زوج انتخاب شود و باید حتماً فرد باشد؛ چون کمترین عکس‌العمل را ایجاد می‌کند. پروانه‌ی چهار پره‌ای بدترین حالت را دارد؛ چون در هر سیکل دورانی همزمان هر چهار پره با جریان و یک چهار هیدروپلن مواجه می‌شود و نوسانات نیروی محوری تولید شده خیلی زیاد خواهد بود؛ لذا انتخاب برای تعداد پرها می‌تواند ۳ یا ۵ و یا ۷ پره‌ای باشد؛ اما از آن جا که ۷ پره‌ای از یک سو پر هزینه است و از سوی دیگر گشتاور بیشتری تولید می‌کند، لذا ۷ پره‌ای چندان مناسب نخواهد بود و پروانه سه پره‌ای هم به علت سطح پره‌ی کم، باعث ایجاد بار متمرکز منجر به وقوع کاویتاسیون می‌گردد؛ لذا افزایش تعداد پره و افزایش سطح پره برای کاهش پدیده‌ی کاویتاسیون مؤثر است، در نتیجه بهترین انتخاب، پروانه‌ای با تعداد ۵ پره است که می‌تواند شرایط مطلوب‌تری از نقطه نظر عملکرد هیدرودینامیکی فراهم نماید [15].

### اثرات اسکيو در عملکرد پروانه

امروزه استفاده از اسکيو در پروانه شناورهای زیرسطحی، اژدها و شناورهای نظامی، بسیار متداول است. اسکيو، همانند زاویه سوئیپ (Sweep angle) در

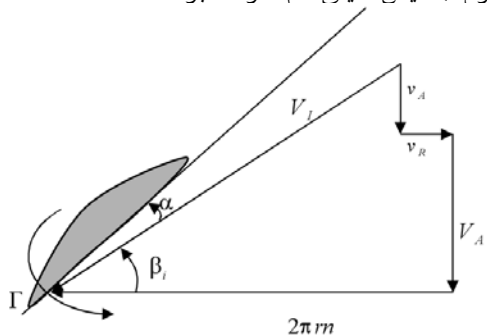
### گام و اثرات آن

گام پره همانند زاویه‌ی حمله در فویل است. با افزایش گام، زاویه حمله  $\alpha$  زیاد می‌شود که باعث افزایش نیروی محوری و گشتاور می‌گردد. شکل (۸)، دیاگرام سرعت در شعاع  $r$  را نشان می‌دهد. سرعت جریان ورودی به پره از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

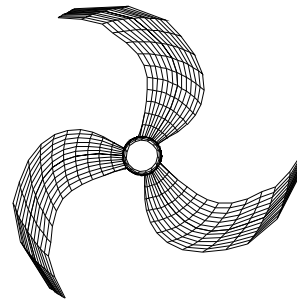
$$V_1^2 = (V_A + v_A)^2 + (2\pi r m - v_R)^2 \quad (22)$$

در رابطه‌ی (۲۲) سرعت‌های  $v_A$  و  $v_R$  به ترتیب سرعت‌های القایی محوری و مماسی می‌باشند.  $\beta_i$  و  $\alpha$  به ترتیب، زاویه گام هیدرودینامیکی و زاویه‌ی حمله هستند. مجموع این دو زاویه، برابر  $\beta_G (= \alpha + \beta_i)$  می‌باشد که در بخش فرمول بندی پروانه آمده است. گام پروانه نیز از رابطه‌ی  $P_G = 2\pi r \tan(\beta_G)$  به دست می‌آید به همین دلیل، هرچه گام بیشتر باشد، زاویه حمله بیشتر است و در نتیجه احتمال وقوع پدیده جدایی و کاویتاسیون خواهد بود. سرعت‌های القایی از مشتق پتانسیل سرعت رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود [4]. طراحان پروانه سعی می‌کنند تا گام و یا زاویه‌ی حمله را طوری انتخاب کنند که پدیده‌ی جدایش رخ ندهد.

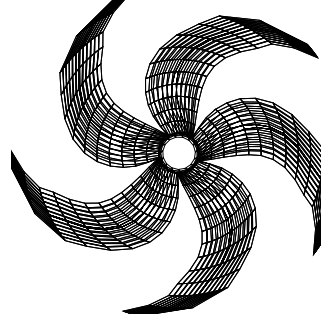
واضح است که هر چه نسبت منطری در فویل و یا در پره کوچکتر باشد، پدیده‌ی جدایش در زاویه بزرگتر رخ می‌دهد. از آن جا که پره پروانه دارای نسبت منطری کمتر از ۳ است، لذا پدیده‌ی جدایش تا زاویه‌ی حمله‌ی ۲۰ درجه رخ نمی‌دهد؛ در حالی که زاویه‌ی حمله از اختلاف زاویه گام هندسی و زاویه گام هیدرودینامیکی  $\alpha (= \beta_G - \beta_i)$  به دست می‌آید و در پروانه با نسبت گام کمتر از ۱ ( $P/D=1$ ) احتمال وقوع جدایش خیلی کم خواهد بود.



شکل ۸ دیاگرام سرعت نسبی در شعاع  $r$  پروانه

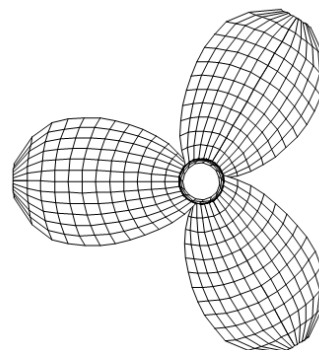


سه پره اسکيو دار-  
BMAXR=0.2490

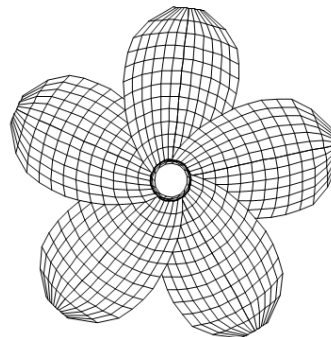


پنج پره اسکيو دار-  
BMAXR=0.2490

شکل ۶ پروانه های سه و پنج پره ای با اسکيو

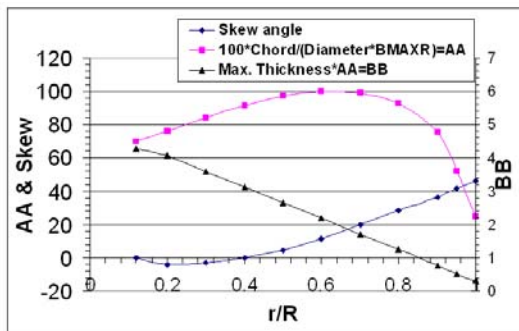


سه پره بدون اسکيو  
BMAXR=0.3698



پنج پره بدون اسکيو  
BMAXR=0.3698

شکل ۷ پروانه های سه و پنج پره ای بدون اسکيو



شکل ۱۰. زاویه اسکيو، طول وتر و ضخامت ماکزیمم بر حسب شعاع برای پروانه انتخاب شده جدید HSP-5

با در نظر گرفتن همه این پارامترها، پروانه‌ی انتخاب شده برای شناور زیرسطحی در شکل (۱۰) نشان داده شده است که عملکرد هیدرودینامیکی آن را مورد تحلیل قرار می‌دهیم. مشخصات اصلی پروانه HSP-5 در جدول (۲) داده شده است.

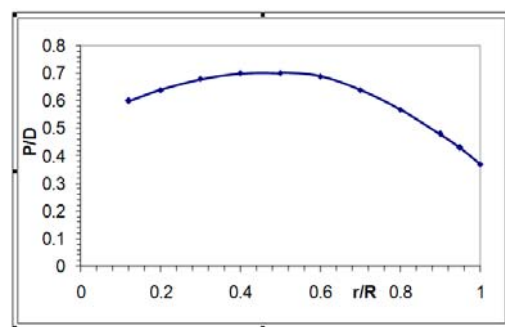
جدول ۲. مشخصات اصلی پروانه HSP-5

HSP-5	نوع پروانه
1.455	قطر [m]
0.65	نسبت سطح گسترش یافته
متغیر (0.6)	نسبت گام (متوسط)
0.15	نسبت شعاع هاب به شعاع پروانه
0.28	نسبت طول وتر ماکزیمم به قطر
5	تعداد پره‌ها
4.0	زاویه ریک [درجه]
متغیر	زاویه اسکيو [درجه]
HSP-SRI-B	مقطع پره

### اثر زاویه ریک پروانه

در شرایط کاری معمولی، اکثراً از پروانه‌های بدون ریک استفاده می‌کنند. استفاده‌ی ویژه از پره‌های ریک مثبت برای ایجاد فضای بیشتر بین پروانه و بدنه است. پروانه‌هایی که زاویه‌ی ریک منفی دارند، به طور معمول در شناورهایی که دارای سرعت بالا و تحت شرایط بارگذاری سنگین قرار می‌گیرند، به کار می‌آیند. در این حالت، زاویه‌ی ریک به مقاومت و استحکام

نگاه دیگری که باید در گام پروانه دیده شود، توزیع شعاعی گام است. امروزه سعی می‌شود گام پروانه در شناورها با گام متغیر طراحی شود. چون در نوک پره بار زیادی به پره اعمال می‌شود، بهتر است در نوک پره گام، کمتر باشد تا شرایط بدون بار در نوک (Tip unloading) فراهم شود و احتمال وقوع کاویتاسیون کاهش یابد. از طرفی در شعاع  $(0.4-0.6)R$  که طول وتر بیشتر است، باید گام بیشتر باشد تا بار در سطوح بیشتر توزیع شود. به طور کلی در طراحی پروانه‌ی شناور زیر سطحی مذکور، با استفاده از سعی و خطای محاسبات به عمل آمده، نشان می‌دهد که پروانه با گام متوسط  $0.6$  برای پروانه زیرسطحی مناسب است و می‌تواند نیروی محوری لازم برای غلبه بر مقاومت را تولید نماید. تغییرات شعاعی گام در شکل (۹) نشان داده شده است. در نوک پره گام  $0.37$  و در وسط گام  $0.72$  انتخاب شده است.



شکل ۹. تغییرات نسبت گام در جهت شعاعی برای پروانه HSP-5

### نسبت طول وتر ماکزیمم به قطر

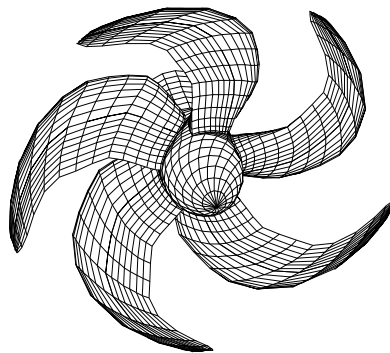
این پارامتر در واقع سطح پره را نشان می‌دهد. به عبارتی این پارامتر با نسبت سطح گسترش یافته (EAR) ارتباط مستقیم دارد. این نسبت با پارامتر  $(C_{Max}/D = BMAXR)$  نشان داده می‌شود. هر چه BMAXR بیشتر باشد، مشاهده می‌شود که پره پروانه عریض‌تر شده و سطح پروانه بیشتر می‌گردد. شکل (۱۰) اثر سه پارامتر (اسکيو، ضخامت و طول وتر) را در جهت شعاعی برای پروانه مورد نظر انتخاب شده نشان می‌دهد.

هیدروپلن‌ها و زاویه دم مخروطی) پارامترهایی هستند که در ایجاد ویک موثرند. بر خلاف شناورهای سطحی، جریان ویک در شناورهای زیرسطحی دارای فرم ساده تری هستند و جریان در پاشنه تقریباً یکنواخت است؛ به جز در حالت‌هایی نظیر مانوردهی و تریم، با جریان غیریکنواخت پیچیده مواجه خواهیم شد [14]. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) جریان ویک را در جلوی پروانه در دو سرعت ۴ و ۸ گره دریایی نشان می‌دهند.

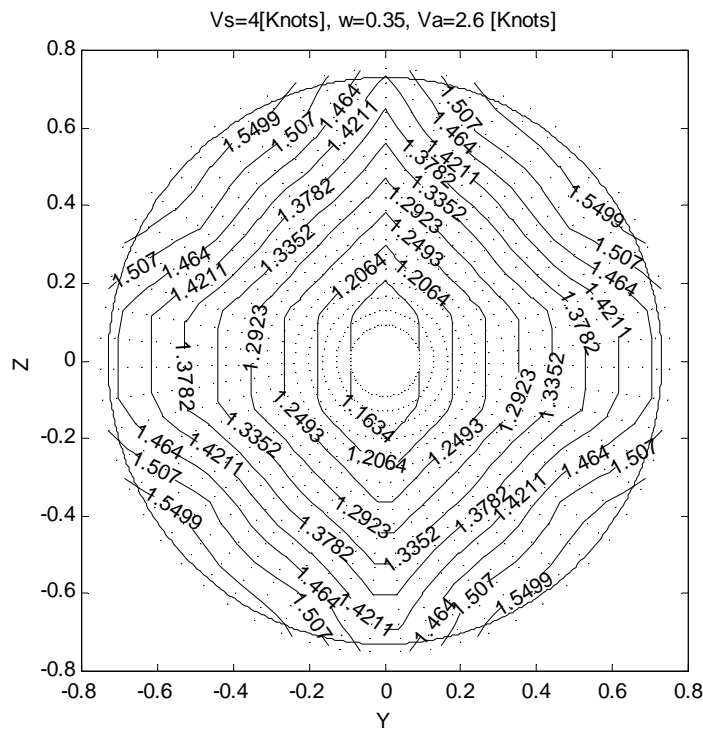
پره‌ها کمک خواهد کرد. حالت ترکیبی ریک مثبت و منفی در یک پروانه نیز وجود دارد که در شعاع نزدیک ریشه، ریک مثبت و در شعاع نزدیک نوک، ریک منفی است. از نقطه نظر هیدرودینامیکی، زاویه ریک کم، چندان تأثیری بر روی عملکرد پروانه ندارد.

### جریان ویک پشت هیدروپلن‌ها

ویسکوز بودن سیال آب و ایجاد لایه‌ی مرزی و همچنین شکل و فرم بدنه (قطر بدنه اصلی،

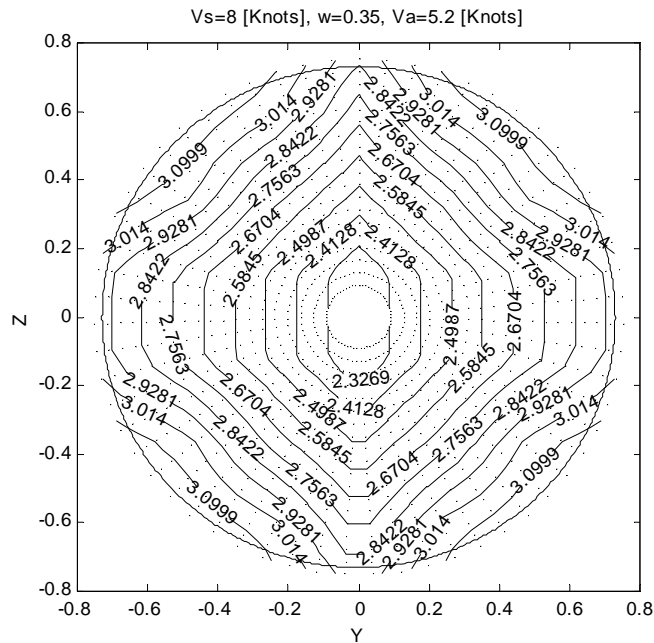


شکل ۱۱ المان بندی پروانه HSP-5

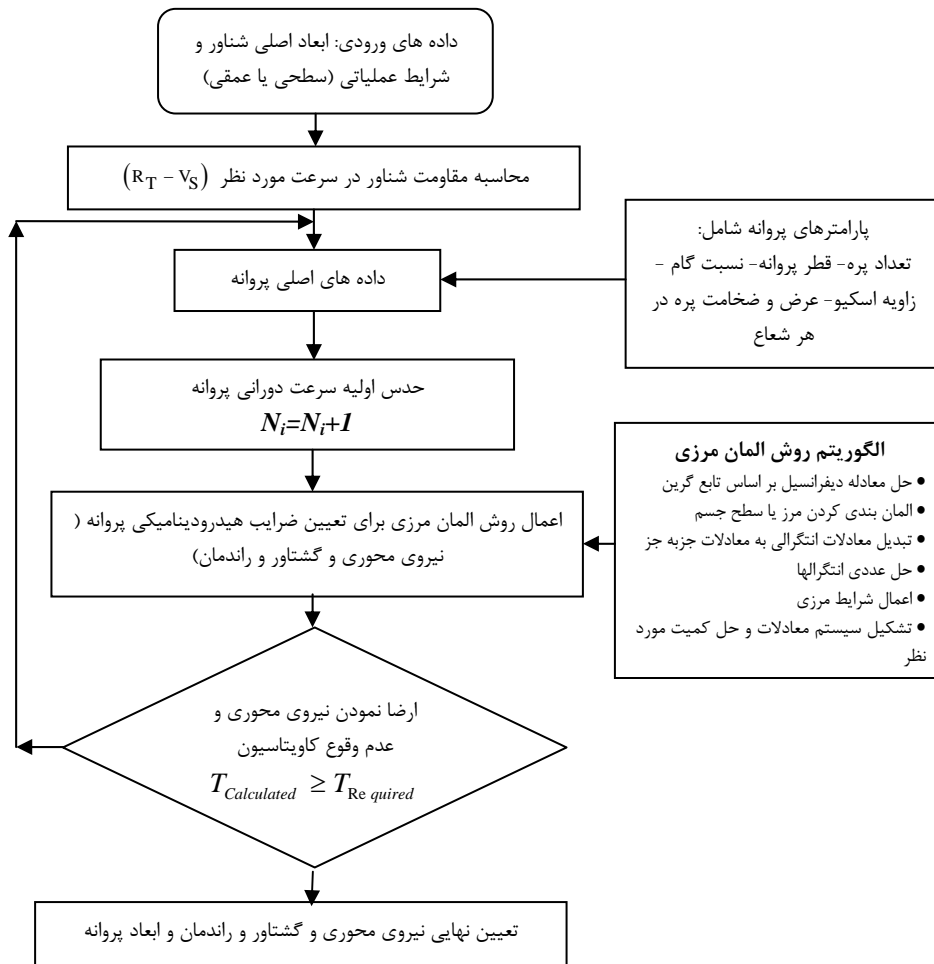


شکل ۱۲ پیشگویی سرعت محوری جریان در پاشنه

(در جلوی پروانه)  $V_s = 4[\text{Knots}], \bar{w} = 0.35, \bar{V}_A = 2.6[\text{Knots}]$



شکل ۱۳ پیشگویی سرعت محوری جریان در پاشنه (در جلوی پروانه)  $V_s = 8[\text{Knots}], \bar{w} = 0.35, \bar{V}_A = 5.2[\text{Knots}]$



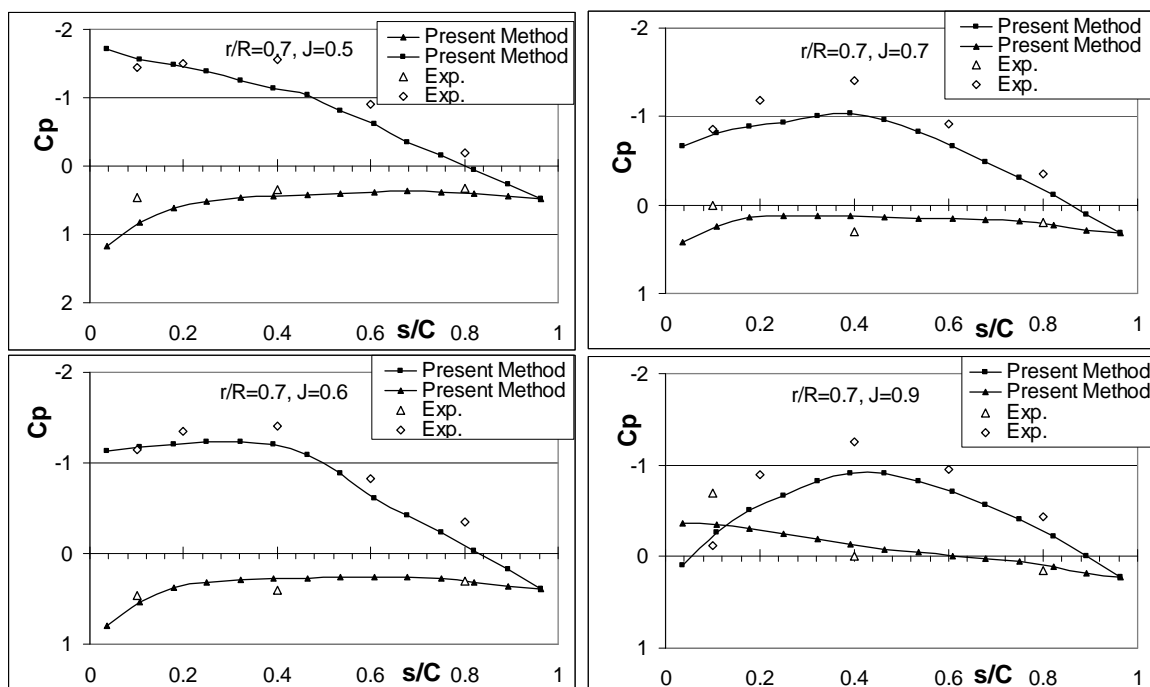
شکل ۱۴ فلوجارت محاسباتی روش المان مرزی برای پروانه شناور زیرسطحی

## فلوچارت محاسبات

فلوچارت محاسباتی روش المان مرزی برای تحلیل پروانه شناور زیرسطحی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این فلوچارت، ابتدا ابعاد اصلی شناور به عنوان داده های ورودی معرفی می شود و سپس محاسبه مقاومت شناور در دو شرایط سطحی و عمقی با استفاده از روش تجربی انجام می شود. سپس داده های هندسی پروانه و پروفیل (ضخامت و کمبرپره)، قطر و گام و تعداد پره ها اعمال شده و مدل سه بعدی پروانه ساخته می شود. بعد از این مرحله، قسمت حل کننده نرم افزار بک مک روش المان مرزی محاسبات هیدرودینامیکی پروانه را انجام می دهد. این نتایج شامل توزیع فشار، نیروهای تراست، گشتاور و راندمان می باشد. در صورت تولید نیروی محوری و عدم وقوع کایسیون نتایج خاتمه می یابد در غیر اینصورت فرآیند محاسبه تکرار می شود.

## محاسبات اوپن واتر

مهم ترین قسمت برای درک عملکرد هیدرودینامیکی پروانه، محاسبه فشار در سطوح پروانه است. در شرایط اوپن واتر، پروانه در مقابل جریان یکنواخت کار می کند و همه پره ها در شرایط یکسان قرار دارند؛ لذا یک پره با تعداد المان های  $(2N \times M)$  تعریف می شود که تعداد تقسیمات در جهت شعاعی  $M$  و در جهت وتر  $N$  می باشد. شکل (۱۵) مقایسه ی توزیع فشار بر روی پروانه HSP در شعاع  $r/R=0.7$  و در نسبت سرعت های  $J=0.5, 0.6, 0.7, 0.9$  را نشان می دهد. این نتایج تجربی در شرایط اوپن واتر توسط هسین و همکارانش گزارش شده است [11]. نتایج محاسبات با روش حاضر در دو نسبت سرعت  $0.5$  و  $0.6$  در مقایسه با نتایج تجربی مطابقت بیشتری دارد.



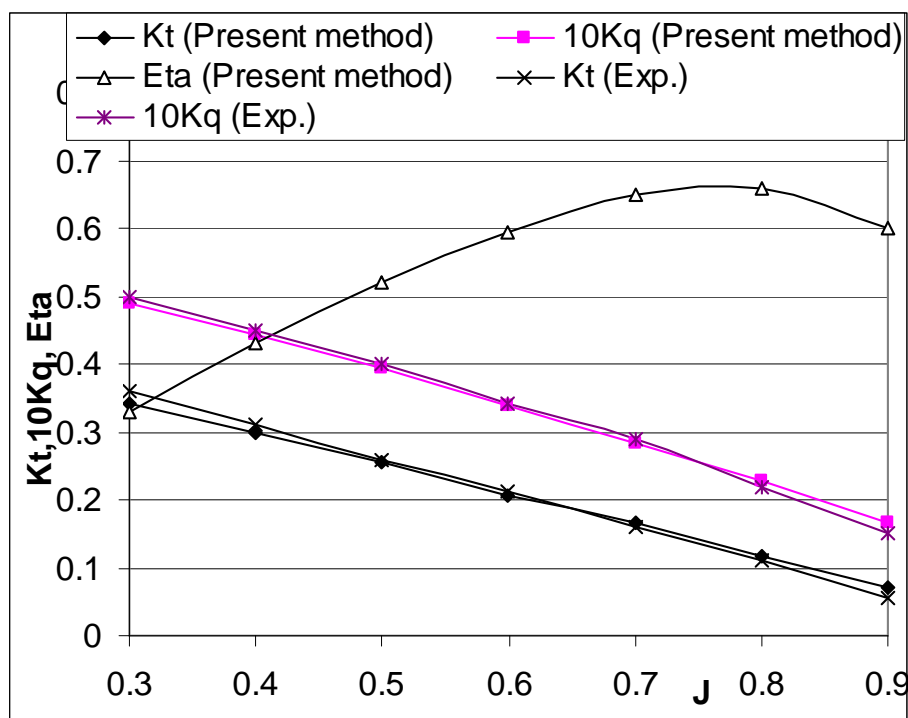
شکل ۱۵ مقایسه ی توزیع فشار بر روی پروانه اسکیدار HSP در شرایط اوپن واتر

در جهت وتر  $N$ ، مجموع کل سیستم معادلات برابر  $(2N \times M \times K)$  می شود که برای پروانه‌ی ۵ پره‌ای ۱۸۲۰ المان تولید شده است. همچنین ۴۰۰ المان برای هاب تولید شده است که در مجموع، تعداد المان‌های کل برابر با ۲۲۲۰ المان است. 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 (نیروی محوری و گشتاور) به دست می آید. در یک سرعت دورانی، زمان محاسبات با کامپیوتر ۲۰۰۰ MHz برای پروانه ۵ پره‌ای و با تعداد المان‌های فوق در حدود ۸ ساعت طول می کشد. بنابراین، محاسبات عملکرد پروانه برای همه‌ی سرعت‌های شناور (از ۱ الی ۱۰ گره دریایی با استپ یک گره) انجام می شود. بنابراین در یک سرعت شناور (مثلاً سرعت ۶ گره) محاسبه عملکرد پروانه در ۶ سرعت دورانی، در حدود ۵۰ ساعت زمان می برد که برای ۱۰ سرعت در مجموع به طور متوسط در حدود ۵۰۰ ساعت زمان برده است.

در نسبت سرعت ۰/۹ در لبه‌ی ابتدایی پره، تغییر فشار نسبت به بقیه‌ی سرعت‌ها متفاوت است. در این سرعت، پروانه در شرایط سبک کار می کند و احتمال وقوع کاویتاسیون کمتر خواهد بود. توزیع فشار در این چهار شکل نشان می دهد که در نسبت سرعت ۰/۵ احتمال وقوع کاویتاسیون بیشتر است، زیرا ضریب فشار منفی در سطح کم فشار بیشتر است. مقایسه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه در شرایط اوپن واتر در شکل (۱۶) نشان داده شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که تطابق خوبی با نتایج تجربی وجود دارد.

#### محاسبات پروانه در شرایط واقعی

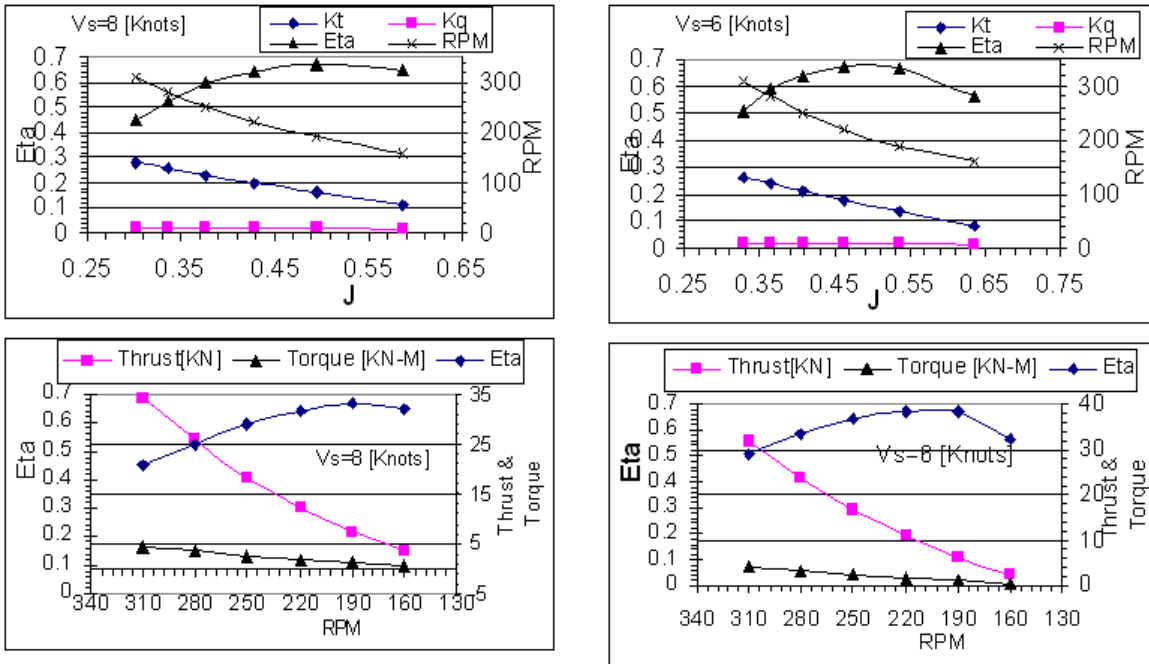
پروانه در پاشنه شناور زیر سطحی کار می کند، یعنی در محلی که جریان ویک ناشی از بدنه و هیدروپلن‌ها وجود دارد. در این حالت، همه پره‌ها در محاسبات لحاظ می شوند. برای پروانه‌ی  $K$  پره‌ای با تعداد تقسیمات المانی در جهت شعاعی  $M$  و تعداد المان



شکل ۱۶ مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه HSP در شرایط اوپن واتر

سطحی، سرعت و راندمان بهینه تعیین می شوند. با استفاده از نیروی مقاومت (پسا) و قدرت کل در شرایط سطحی ( $D=T$ ) و عمقی ( $H \gg D$ ) و معلوم بودن عملکرد هیدرودینامیکی پروانه می توان سرعت بهینه شناور را به دست آورد.

همچنین در شکل های (۱۷) و (۱۸)، محاسبات عملکرد هیدرودینامیکی پروانه (نیروی محوری، گشتاور و راندمان) در شرایط عمقی و سطحی، به ترتیب نشان داده شده است. حال باید دید که چگونه با داشتن عملکرد پروانه در شرایط حرکت عمقی و حرکت

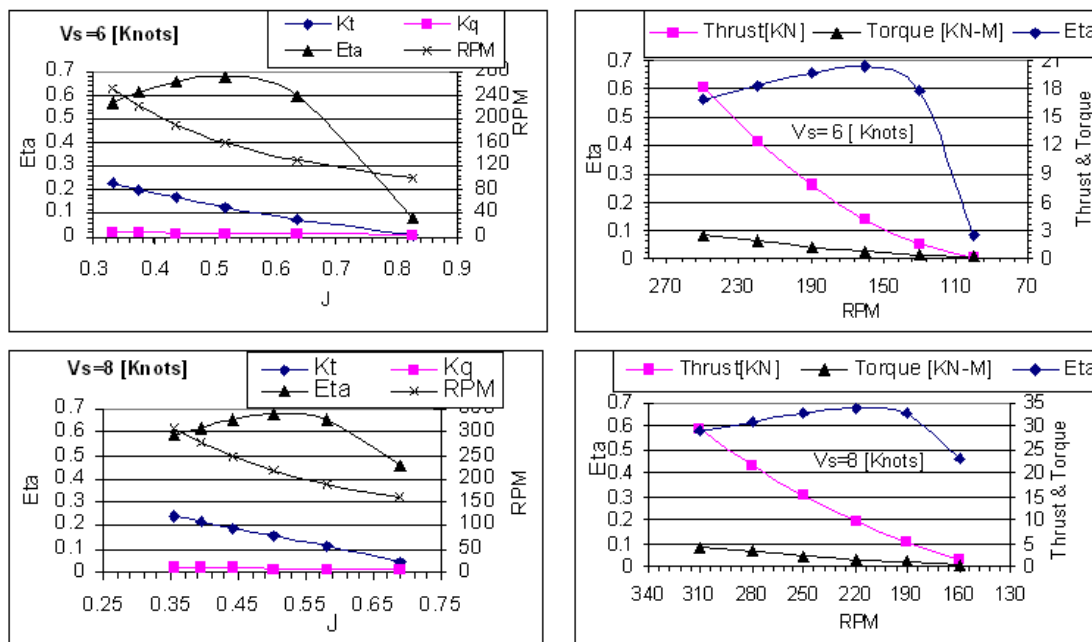


شکل ۱۷ عملکرد هیدرودینامیکی پروانه ۵ پره ای HSP-5 در دو سرعت ۶ و ۸ نات و در شرایط سطحی

جدول ۳ محاسبات قدرت در دو شرایط سطحی و عمقی و در سرعت های ۴ و ۸ گره دریایی

سرعت ۸ گره دریایی		سرعت ۴ گره دریایی		پارامترها
حالت زیرسطحی	حالت سطحی	حالت زیرسطحی	حالت سطحی	
36.0908	42.3972	4.9754	5.1464	توان موثر ( $P_E$ ) مورد نیاز شناور (Kw)
0.68	0.65	0.64	0.63	راندمان پروانه ( $\eta_B$ )
1.307	1.307	1.307	1.307	راندمان بدنه ( $\eta_H$ )
0.95	0.95	0.95	0.95	راندمان گیربکس ( $\eta_{GB}$ )
0.97	0.97	0.97	0.97	راندمان شفت ( $\eta_S$ )
0.96	0.96	0.96	0.96	راندمان دیگر تجهیزات مکانیکی ( $\eta_{other}$ )
0.886	0.882	0.855	0.840	راندمان هیدرودینامیکی کل ( $\eta_D = \eta_H \eta_B$ )
0.89	0.89	0.89	0.89	راندمان مکانیکی کل ( $\eta_M = \eta_S \eta_{GB} \eta_{other}$ )
40.73	48.07	5.819	6.126	توان تحویلی به پروانه (Kw) ( $P_D = P_E / \eta_D$ )
45.78	54.02	6.538	6.884	قدرت مورد نیاز موتور (Kw) ( $P_B = P_D / \eta_M$ )





شکل ۱۸ عملکرد هیدرودینامیکی پروانه ۵ پره ای HSP-5 در دو سرعت ۶ و ۸ نات و در شرایط عمقی

شرایط سطحی:

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

$$\text{RPM} = 240$$

$$\eta_B = 0.65$$

For Surfaced

$$(H = D_{\text{Hull}})$$

سپس برای سرعت‌های دیگر، محاسبات را ادامه داده و به همین ترتیب راندمان هیدرودینامیکی در پشت شناور  $\eta_B$  و سرعت دورانی (RPM) در هر سرعت شناور به دست آید. در این جا لازم به یادآوری است که در دو شرایط عمقی و سطحی، فرض شده است که دو فاکتور ویک (w) و کاهش نیروی محوری (t) یکسان می‌باشند. این فرض، معقول است؛ چون که پروانه در هر دو شرایط، غوطه‌ور بوده و جریان ویک و فاکتور کاهش نیروی محوری مستقل از ارتفاع غوطه‌وری می‌باشند. با داشتن مقادیر نیروی محوری مورد نیاز و راندمان هیدرودینامیکی پروانه در پشت شناور، قدرت تحویلی و قدرت موتور به دست می‌آید. در جدول (۳) محاسبات قدرت در دو شرایط سطحی و عمقی و در سرعت‌های ۴ و ۸ گره دریایی آمده است. لازم به ذکر است که راندمان بدنه و راندمان کل هیدرودینامیکی پروانه از روابط زیر به دست می‌آیند:

### محاسبات و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه

در این جا به عنوان مثال، سرعت ۸ گره دریایی را در نظر می‌گیریم که مقاومت کل آن در شرایط عمقی برابر  $8.77 [\text{KN}]$  و در شرایط سطحی برابر  $10.3028 [\text{KN}]$  است. نیروی محوری مورد نیاز (T) برای راندن شناور در شرایط عمقی و در سرعت ۸ گره دریایی برابر است با (فرض می‌کنیم  $t=0.15$ ):

$$T = \frac{R_T}{1-t} = \frac{8.77}{1-0.15} = 10.3178 [\text{KN}] \quad (23)$$

حال با استفاده از شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مقادیر سرعت دورانی و راندمان پروانه را طوری پیدا می‌کنیم تا بتواند نیروی محوری مورد نیاز شناور را جوابگو باشد. مقادیر زیر در دو شرایط عمقی و سطحی به دست آمده‌اند:

شرایط عمقی :

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

$$\text{RPM} = 227$$

$$\eta_B = 0.68$$

For Fully Immersed

$$(H \gg D_{\text{Hull}})$$

## فهرست علائم

$A_E / A_0 = EAR$	نسبت سطح گسترش یافته
$C(r)$	طول وتر در هر شعاع
$C(j)$	طول وتر گسترش یافته
$C_{Max} / D$	نسبت وتر ماکزیمم به قطر
$D$	قطر پروانه
$D_{Hull}$	قطر بدنه
$H$	ارتفاع پره تا سطح آزاد آب
$J$	ضریب پیشروی
$K$	تعداد پره های پروانه
$K_t$	ضریب نیروی محوری
$K_q$	ضریب گشتاور
$L(r)$	فاصله‌ی لبه‌ی جلویی تا مختصات وتر
$M$	تعداد المان‌های شعاعی پروانه
$N_C$	تعداد تقسیمات در جهت وتر
$N$	تعداد تقسیمات شعاعی
$N_W$	تعداد المان‌های روی سطح ورتکس
$N_{tot}$	مجموع المان‌های روی سطح پروانه
$N_R$	تعداد کل المان‌ها در لبه فرار
$n$	سرعت دورانی پروانه
$(n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$	بردار واحد عمود بر سطح
$P_{atm}$	فشار اتمسفر
$P_0$	فشار هیدرواستاتیک در محل شافت پروانه
$P_G$	گام هندسی پروانه
$P_v$	فشار اشباع آب دریا
$P_{Et}$	قدرت مؤثر کل
$P / D$	نسبت گام
$p(x,y,z)$	نقطه‌ی کنترل
$q(\xi, \eta, \zeta)$	نقطه محل سینگولاریته‌ها
$Q$	گشتاور
$R(p;q)$	فاصله‌ی بین نقطه $p$ و $q$
$R_T$	مقاومت شناور
$R$	شعاع پروانه
$r_h$	شعاع هاب

$$\text{Hull Efficiency} = \eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (24)$$

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

## نتیجه گیری

در این مقاله روش المان مرزی برای تحلیل و عملکرد هیدرودینامیکی پروانه شناور زیرسطحی استفاده شده است. بر اساس محاسبات آن جام شده، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

۱- مقایسه‌ی نتایج محاسبات توزیع فشار و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه ۵ پره‌ای اسکيو دار HSP-5 در شرایط اوپن واتر با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که روش حاضر، کارایی بالایی دارد. راندمان پروانه برای دو حالت عمقی و سطحی، به ترتیب برابر ۶۸٪ و ۶۵٪ به دست آمده است که در مقایسه با پروانه های معمولی راندمان بالایی خواهد بود.

۲- برای ارضای شرط مرزی کاتا، نیاز به یک تکنیک خاص تکراری در روش‌های محاسبات عددی است که در این الگوریتم محاسباتی اعمال شده است.

۳- در این روش، مبنای طراحی و انتخاب بعضی از پارامترها مثل تعداد پره، زاویه‌ی اسکيو، زاویه ریک، گام و نسبت سطح گسترش یافته با استفاده از مراجع مرتبط و تجربیات مؤلف مقاله‌ی حاضر و همچنین از محاسبات سعی و خطا به دست آمده است.

۴- لازم به توضیح است که این محاسبات با استفاده از نرم افزار (Ship Propeller Design\_Underwater Vehicle) SPD\_UV که توسط مؤلف مقاله تهیه شده، آن جام شده است. این نرم افزار می‌تواند کلیه‌ی محاسبات و طراحی پروانه را آن جام دهد و تاکنون در چند پروژه‌ی مربوط به طراحی پروانه کشتی‌ها و زیردریایی‌ها استفاده شده و نتایج عملی خوبی داشته است.

YB, YF	مختصات عقب و جلو از خط وتر	$\vec{r}$	بردار موقعیت نقطه کنترل
Z	تعداد پره‌ی پروانه	$r_n / R$	نسبت شعاع هاب به شعاع پروانه
		$r / R$	نسبت شعاع به شعاع کل پروانه
	علائم یونانی	$r$	شعاع پروانه در هر مقطع
$\Delta S_i$	سطح هر المان	$S_B$	سطح جسم
$\omega$	سرعت زاویه‌ای	$S_W$	سطح ویک دنباله‌ای
$\Phi$	پتانسیل کل	$S_{ij}^K$	ضریب چشمه
$\phi$	پتانسیل جزئی	$S(r)$	فاصله‌ی خط مولد تا لبه‌ی جلویی پره
$\partial/\partial n_q$	مشتق نرمال در نقطه‌ی q	$t$	فاکتور کاهش نیروی محوری
V	ضریب ویسکوزیته‌ی جنبشی	T	نیروی محوری (تراست)
$\rho$	دانسیته‌ی آب	$t_{max}(j)/C(j)$	نسبت ضخامت ماکزیمم در هر مقطع پره
$\theta_k$	زاویه‌ی شاخص پره	$\vec{v}_A, \vec{v}_R$	سرعت‌های القایی محوری و شعاعی
$\beta_G$	زاویه‌ی گام هندسی	$V_S$	سرعت شناور
$\gamma$	زاویه‌ی ریک	$V_A$	سرعت پیشروی
$\omega$	سرعت زاویه‌ای	$VI(j)$	برآیند سرعت جریان ورودی محلی
$\eta_B$	راندمان پروانه در عقب شناور	$V_A$	سرعت پیشروی
$\eta_H$	راندمان بدنه	$\vec{v}_w$	سرعت جریان ویک
$\eta_M$	راندمان مکانیکی	$v_I$	برآیند سرعت جریان ورودی
$\eta_S$	راندمان شفت	w	فاکتور ویک
$\eta_{Tot}$	راندمان کل	$W_{ij}^K, D_{ij}^K$	ضریب دوقطبی روی جسم و دنبال
		$(x_i, y_i, z_i)$	مختصات $P_i$

### مراجع

۱. قاسمی حسن: "بکارگیری روش المان مرزی و الگوریتم سیستماتیک برای طراحی پروانه کشتی"، مجله علمی پژوهشی مهندسی دریا، شماره ۱، تابستان (۱۳۸۳).
۲. فدوی سید حسن، قاسمی حسن، یوسف نژاد رضا: "ارائه نرم افزار بصری برای محاسبات هیدرودینامیکی زیردریایی"، ششمین همایش صنایع دریایی ایران، بندرعباس، بهمن (۱۳۸۳).
3. Breslin J.P. and Andersen P., "Hydrodynamics of Ship Propellers", Cambridge Ocean Technology Series 3, (1994)
4. Carlton, J. "Marine Propeller and Propulsion", Butterworth-Heinemann Ltd, (2006).
5. Banerjee P.K. and Morino L. "Boundary Element Method in Nonlinear Fluid Dynamics", Textbook, Elsevier co. (1992).
6. Power H. "Boundary Element Applications in Fluid Mechanics", Textbook, John Wiley, (1995).
7. Gao, X.W., Davies, T.G., "Boundary Element Programming in Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, (2002).

8. Kinnas S.A. and Hsin C.Y., "Boundary Element Method for the Analysis of the Unsteady Flow around Extreme Propeller Geometry", *AIAA, Journal*, 30 (3), (1992).
9. Ohkusu M., "Advances in Marine Hydrodynamics, Chapter 6, Theory and Numerical Methods for the Hydrodynamic Analysis of Marine propellers", Computational Mechanics Publications, pp279-322, (1996)
10. Ghassemi, H. "Hydrodynamic Characteristics of Marine Propeller in Steady and Unsteady Wake Flows", *Journal of Science and Technology of AmirKabir*, Vol.14, No. 54-B, Spring (2003).
11. 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).
12. Burcher, R. and Rydill, L. "Concepts in Submarine Design", Department of Mechanical Engineering, University College London, (1994).
13. Tuck, E.O., Scullen, D.C. and Lazauskas, L. "Sea Wave Pattern Evaluation of Submarine", *Proceedings of the 21<sup>th</sup> conf. on Naval Hydrodynamics*, Australia, (2000).
14. Felice F. D., Felli, M., Liefvendahl, M., Svennberg, U., "Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller", *First International Symposium on Marine Propulsors Symp'09, Trondheim*, Norway, June (2009).
15. Andersen, P., Kappel, J.J., Spangenberg, E., "Aspects of Propeller Developments for a Submarine", *First International Symposium on Marine Propulsors Symp'09, Trondheim*, Norway, June (2009).
16. 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).
17. Morino L. and Kuo C.C. "Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configuration: A general Theory", *AIAA Journal*, 12 (2), 191-197, (1974).
18. 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*, Vol. 213, , pp.277-289, (2009)