

عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه مغروق با استفاده از روش المان مرزی

حسن قاسمی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ابوالفضل نظری (کارشناس ارشد)

مرکز تحقیقات شناوری، سازمان تحقیقات خودکفایی نوسا

مرتضی قصابزاده (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

امروزه استفاده از پروانه‌های نیمه مغروق (SPP)^۱ برای شناورهای تندرو، با توجه به بازدهی بالا و داشتن قابلیت مانور افزایش روزافزونی یافته است. با توجه به نحوه‌ی عملکرد این نوع پروانه‌ها که هم در حالت دوفازی (آب و هوا)، و هم در سرعت دورانی بالا کار می‌کند محاسبات و تحلیل عددی آن بسیار پیچیده است. آزمایش‌های انجام شده روی هندسه‌ی پروانه و شرایط فیزیکی آن نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی - نظیر تعداد پره‌ها، گام، فرم پروفیل پره - و شرایط کاربرد آن - نظیر ارتفاع غوطه‌وری، زاویه‌ی محور، سرعت شناور و سرعت دورانی پروانه - تأثیر به‌سزایی بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه مغروق دارد. در این نوشتار، با استفاده از داده‌های حاصل از نتایج تجربی موجود [۵-۱] نسبت به تعیین شرایط گذرا اقدام، و با کمک روش المان مرزی به محاسبات و تحلیل هیدرودینامیکی این نوع پروانه پرداخته شده است. این نتایج تجربی به‌عنوان شرایط مرزی مهم در حل به روش المان مرزی اعمال شده است. در روش حاضر دو نوع پروانه‌ی نیمه مغروق نوع اول (SPP ۱^۰) و پروانه‌ی نیمه مغروق نوع دوم (SPP ۱^۰ ۲) برای محاسبات در نظر گرفته شده است؛ همچنین نتایج حاصله - شامل ضریب تراست، گشتاور و راندمان - در مقایسه با نتایج تجربی دیگران نشان می‌دهد که روش المان مرزی با شرایط مرزی تعریف شده مطلوب و رضایت‌بخش است و می‌تواند برای تحلیل این نوع پروانه‌ها مرجع مناسبی باشد.

واژگان کلیدی: پروانه‌های نیمه مغروق، روش المان مرزی، عملکرد هیدرودینامیکی.

gasemi@aut.ac.ir
a_nazari1400@yahoo.com
ghassabzadeh@aut.ac.ir

مقدمه

پروانه‌های نیمه مغروق نوع ویژه‌ی از پروانه‌های سوپرکاویتاسیون هستند که در شرایط دوفازی (آب و هوا) عمل می‌کنند. از مزایای این پروانه‌ها می‌توان بازدهی بالا، قدرت مانور مناسب و کاهش درگ شناور و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف سوخت را نام برد. عملکرد پروانه بدین صورت است که تقریباً نیمی از پروانه در داخل آب است و در یک سیکل دورانی، هر پره یک‌بار به سطح آب برخورد می‌کند و پاشش ایجاد می‌شود. برخورد پره به آب باعث فشار و ضربه به روی سطح پره می‌شود که باید از نظر استحکام سازه‌ی مورد بررسی قرار گیرد. امروزه با توجه به کاربرد گسترده‌ی این نوع پروانه‌ها در محدوده‌ی وسیعی از شناورهای تفریحی و نظامی، دانشمندان سرگرم انجام تحقیقات و مطالعات تجربی و عددی در خصوص این نوع پروانه‌ها هستند. طی سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص اثرات عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه مغروق با استفاده از کارهای تجربی انجام شده [۱-۵] به عمل آمده

است. در این آزمایشات اثرات پارامترهای مختلف (نظیر گام پروانه، فرم پروفیل پره، زاویه‌ی شیب محوری پروانه، عمق غوطه‌وری پروانه و عدد کاویتاسیون) مورد بررسی قرار گرفت.^[۱] نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای زیادی بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه مغروق تأثیرگذار است. تیم تحقیقاتی مذکور ضمن بیان اثرات هر یک از این پارامترهای مهم در پروانه‌ی نیمه مغروق، توانسته رابطه‌ی مناسبی برای تعیین نقطه‌ی گذرا به دست آورد که می‌تواند نقش کمی خوبی در روش‌های عددی داشته باشد.^[۵]

به‌علت کارکردن پروانه‌های نیمه مغروق در دو سیال آب و هوا که هر یک خاصیتی متفاوت دارند، به‌کارگیری روش‌های عددی به‌منظور تحلیل و طراحی، با پیچیدگی در ساخت مدل ریاضی همراه است. این در حالی است که پره‌های پروانه‌های مرسوم همگی مغروق بوده و در یک سیال با ویژگی‌های همگن قرار دارند و مدل کردن آنها ساده‌تر است. علی‌رغم وجود مشکلات زیاد در خصوص این نوع پروانه‌ها، طراحان سرگرم طراحی پروانه‌های سوپرکاویتاسیون در حالت آب آزاد بوده و در این خصوص

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۶/۶، داوری ۱۳۸۸/۸/۳، پذیرش ۱۳۸۸/۱۲/۱۱.

دوم پارامترهای فیزیکی هستند که بیان آنها چنین است: [۱۳]

$$K_t \text{ or } K_q = f(\underbrace{Z, P/D, EAR, f, t, \theta_s, \gamma}_{\text{Geometrial}}, \underbrace{I_T, \psi, J, F_n, R_n, \sigma, W_n}_{\text{Physical}}) \quad (1)$$

که در آن:

Z : تعداد پره؛

P/D : نسبت گام به قطر؛

EAR : نسبت سطح گسترش یافته؛

f : کمبر پره؛

t : ضخامت پره؛

θ_s : زاویه‌ی اسکيو؛

γ : زاویه ریک؛

I_T : ضریب غوطه‌وری؛

ψ : شیب محوری شافت؛

J : نسبت سرعت پیشروی؛

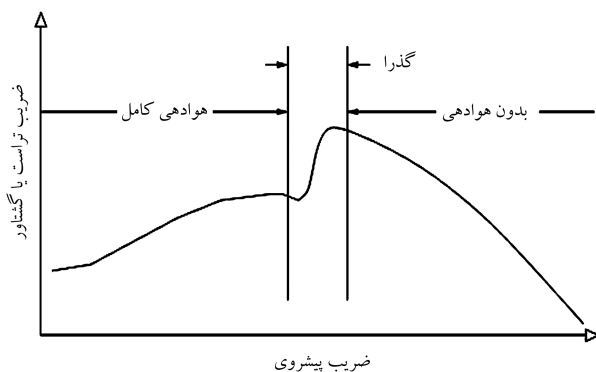
F_n : عدد فرود؛

R_n : عدد رینولدز؛

σ : عدد کاویتاسیون؛

W_n : عدد وبر.

در شکل ۱، چنان که تغییرات ضریب تراست و گشتاور پروانه (K_t , K_q , η) برحسب نسبت سرعت پیشروی ($J = V_A/nD$) نشان می‌دهند (D قطر، n سرعت دورانی و V_A سرعت ورودی سیال به پروانه است) وقتی پروانه شروع به کار می‌کند تراست تولید می‌کند و باعث حرکت شناور می‌شود. در لحظه‌ی شروع حرکت، شرایط عملکردی پروانه شرایطی سنگین است و بار زیادی روی پره‌ها وارد می‌شود که موجب بروز پدیده‌ی کاویتاسیون لایه‌یی می‌شود. چون پروانه در نزدیکی سطح آب آزاد قرار دارد، به‌جای کاویتاسیون با پدیده‌ی هوادهی^۲ مواجه خواهیم بود. بعد از این مرحله، اگر شناور بتواند به مرحله‌ی اسکيو^۴ برسد سرعت شناور زیاد می‌شود و پروانه از شرایط گذرا عبور می‌کند. با افزایش سرعت شناور مقدار J زیاد و پروانه در شرایط سبک کار می‌کند و بار کم‌تری به پره‌ها وارد می‌شود. در نتیجه مقدار هوای موجود در سطح پره کاهش می‌یابد، به طوری که در طرف سطح پره تقریباً به‌طور کامل



شکل ۱. روند تغییرات ضریب تراست یا گشتاور پروانه نیمه‌مغروق در سه منطقه (هوادهی کامل، گذرا و هوادهی جزئی). [۱]

نتایج آزمایشات را با پروانه‌های مرسوم مقایسه می‌کنند. همچنین پارامترهای یکسان، نظیر نسبت گام این دو نوع پروانه، را مورد مقایسه قرار می‌دهند. علاوه بر این، پروانه‌های نیمه‌مغروق سبب کاهش قابل توجه مقاومت ملحقات شناور می‌شوند. این کاهش مقاومت ضمام (ملحقات) در شناورهای تندرو قابل توجه است و برای این نوع شناورها حدوداً ۱۰٪ یا بیشتر از کل مقاومت ضمام شناور است. بنابراین قدرت مورد نیاز برای رانش شناورهایی با این نوع پروانه نسبت به شناورهای دارای پروانه‌های معمولی، کاهش قابل توجهی دارد.

از میان محققانی که با استفاده از روش عددی بر روی پروانه‌ی نیمه‌مغروق کار کرده‌اند [۱۱، ۱۲] برخی در تز دکتری خویش تحلیل عددی پروانه‌های سوپرکاویتاسیونی و نیمه‌مغروق را مورد تحلیل و بررسی قرار داده و نتایج مناسبی از توزیع فشار و ضرایب هیدرودینامیکی به دست آورده‌اند. [۱۱] در روسیه نیز تحقیقات گسترده‌یی در مورد پروانه‌های نیمه‌مغروق انجام شده است؛ از آن جمله، در سال ۲۰۰۷ برای یک پروانه‌ی نیمه‌مغروق ۵ پره نتایج عددی و تجربی ارائه کرده‌اند. [۱۲] طی دو سال گذشته نیز با استفاده از روش المان مرزی، تحقیقات گسترده‌یی در مورد تحلیل و محاسبات هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق توسط محققین داخلی انجام گرفته است. [۱۳-۱۵]

چنان که بیان شد، پارامترهای زیادی در پروانه‌های نیمه‌مغروق مورد توجه است. این پارامترها عبارت‌اند از: قطر، نسبت گام، مقطع و شکل پره، زاویه یا شیب محور، ارتفاع غوطه‌وری، اثر سطح آزاد و کشش نیمه‌مغروق، عدد فرود و عدد رینولدز. نکته‌ی قابل توجه در خصوص این نوع پروانه‌ها، عبور هوا از روی پره‌های پروانه و جلوگیری از پدیده‌ی کاویتاسیون است. از آنجا که زاویه‌ی محور و نسبت مغروق بودن پروانه در عقب شناور تأثیر مهمی در عملکرد آنها دارد، نصب این پروانه‌ها از اهمیت و حساسیت خاصی برخوردار است. در حالت بهینه حدود ۴۰ درصد قطر پروانه در آب قرار دارد.

در این نوشتار، محاسبات و تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از روش عددی المان مرزی و نیز به‌کارگیری شرایط مرزی خاص برای پروانه‌های نیمه‌مغروق شناورهای تندرو صورت گرفته است. شرایط مرزی خاص از روش تجربی برای مشخص کردن منطقه‌ی گذرا به دست آمده که می‌تواند در روش عددی المان مرزی نقش کمکی و تعیین‌کننده‌یی برای اعمال شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی داشته باشد. در مدل سه‌بعدی پروانه به المان‌های چهارگوش تقسیم می‌شود، و معادله‌ی انتگرالی گرین در هر المان اعمال، و ضرایب مؤثر ماتریسی محاسبه و به فرم دستگاه معادلات درآورده می‌شود. بعد از حل دستگاه معادلات کمیت مورد نظر، یعنی پتانسیل، در هر المان محاسبه می‌شود. سپس با مشتق‌گیری از پتانسیل، پارامترهای سرعت و فشار و در نتیجه نیروها و گشتاور هیدرودینامیکی پروانه محاسبه می‌شود. در این نوشتار دو پروانه‌ی نیمه‌مغروق SPP۱۰۱ و SPP۱۰۲ با مشخصات داده شده مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته‌اند.

نتایج تحلیل پروانه‌ی اولی SPP-۱ با نتایج تجربی مقایسه شد و پس از تأیید و راستی‌سنجی روش، عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌ی دومی SPP-۲ در شرایط مختلف نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

تعیین شرایط گذرا

به‌طور کلی، پارامترهای مؤثر در ضرایب هیدرودینامیکی K_t و K_q پروانه‌های نیمه‌مغروق به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول پارامترهای هندسی و دسته‌ی

مختصات دست راست $O - xyz$ را کامل می‌کند. مختصات نقطه روی سطح پره k در طرف عقب و جلو چنین بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} x_{B,F} &= r \tan \gamma + (S(r) + L(r)) \sin \beta_r - Y_{B,F} \cos \beta_r \\ y_{B,F} &= r \cos(\eta_{B,F} + \theta_k) \\ z_{B,F} &= r \sin(\eta_{B,F} + \theta_k) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \eta_{B,F} &= [(S(r) + L(r)) \cos \beta_r + Y_{B,F} \sin \beta_r] / r \\ \theta_k &= 2\pi(k - 1) / Z \quad k = 1, 2, \dots, Z \\ \beta_r &= \tan^{-1} \left(\frac{PG}{2\pi r} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

θ_k : زاویه‌ی شاخص پره؛

r : مختصات شعاعی پروانه؛

β_r : زاویه‌ی گام هندسی؛

PG : گام هندسی پروانه؛

$S(r)$: فاصله‌ی خط مولد تا لبه‌ی جلویی پره؛

$L(r)$: فاصله‌ی لبه‌ی جلویی تا مختصات کوردد؛

Y_B, Y_F : مختصات عقب و جلو از خط اصلی.

نسبت ضریب پیشروی (J_ψ) برحسب زاویه‌ی محور پروانه یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی پروانه‌های نیمه‌مغروق است که مقدار آن برحسب تغییر زاویه‌ی محور ψ تغییر می‌یابد و مقدار آن از فرمول ۶ محاسبه می‌شود:

$$J_\psi = \frac{V_A \cos \psi}{nD} \quad (6)$$

۲. روش المان مرزی و معادله‌ی حاکم

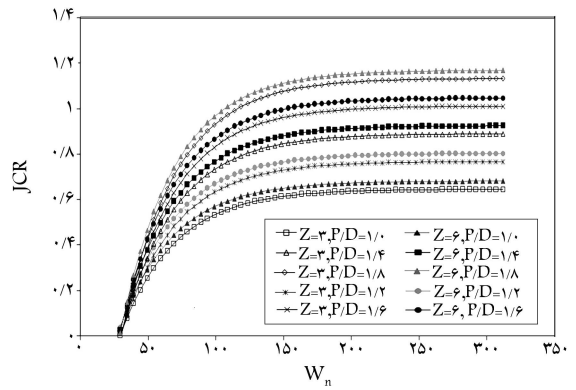
این روش مبتنی بر تابع گرین است؛ تابع گرین برای یک معادله‌ی دیفرانسیل جزئی $\nabla^2 G = \delta(r)$ در سه‌بعدی برابر $G = 1/(4\pi r)$ است. تابع دلتا $\delta(r)$ با فرض وجود چشمه در نقطه‌ی q و چگالی جریان در نقطه‌ی p است $(\vec{r} = \vec{q} - \vec{p})$. تابع پتانسیل جریان $\phi(P)$ برای هر نقطه روی سطح $S(t)$ با استفاده از جواب عمومی معادله‌ی لاپلاس براساس تابع گرین بیان می‌شود:

$$2\pi\phi_P(t) = \int_{S(t)} \left\{ \phi_q(t) \frac{\partial}{\partial n_q(t)} \left(\frac{1}{R(p; q)} \right) - \frac{\partial \phi_q(t)}{\partial n_q(t)} \left(\frac{1}{R(p; q)} \right) \right\} dS \quad (7)$$

که در آن $S(t) = S_B(t) \cup S_C(t) \cup S_F(t)$ است. $S_B(t)$ سطح خیس شده‌ی پروانه و $S_C(t)$ سطح هواده‌ی پروانه و $S_F(t)$ سطح آزاد آب است (شکل ۴) در رابطه‌ی ۷، پارامترهای $R(p; q)$ فاصله‌ی بین نقطه‌ی p است که می‌خواهیم میدان جریان (کمیت مورد نظر) را به دست آوریم تا نقطه‌ی q که چشمه در آن قرار دارد. بردار نرمال واحد بر روی سطح انتگرال است که با جهت مثبت به داخل سیال است. در اینجا به شرایط مرزی مسئله می‌پردازیم.

الف) شرط مرزی سینماتیکی: این شرط مرزی بیان می‌کند که سرعت کل عمود بر سطح جسم $S_B(t)$ باید صفر باشد یعنی داریم:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial(\phi + \vec{V}_{in} \cdot \vec{X})}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{V}_{in} \cdot \vec{n} \quad (8)$$



شکل ۲. اثر عدد وبر (W_n) و نسبت گام (P/D) و تعداد پره بر نسبت سرعت پیشروی بحرانی J_{CR} .

خیس است. در این منطقه هواده‌ی جزئی خواهیم داشت؛ لذا این منطقه همانند شرایط پروانه‌ی مغروق است.^[۱]

شرایط گذرا تحت تأثیر عدد وبر و نسبت گام است. با افزایش عدد وبر (W_n) تأثیر آن بر سرعت پیشروی بحرانی (J_{CR}) کاهش می‌یابد. می‌توان عدد وبری یافت که در بالاتر از آن این تأثیر محو شود؛ این مقدار بستگی به نسبت گام دارد. مقدار J_{CR} نیز بستگی به نسبت گام دارد. در شکل ۲ اثر عدد وبر و نسبت گام و تعداد پره‌ها بر نسبت سرعت پیشروی نشان داده شده است. در کار تحقیقاتی حاضر، با استفاده از نتایج تجربی موجود، رابطه‌ی ۲ برای پروانه‌های نیمه‌مغروق و به منظور تعیین نسبت سرعت بحرانی به دست آمده است:

$$J_{CR} = \frac{P}{D} (K_1 + K_2 e^{K_3 W_n} + K_4 Z), \quad (2)$$

که در آن عدد وبر از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

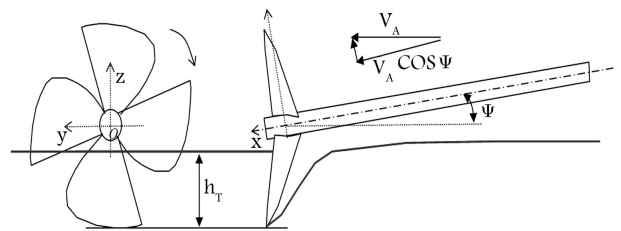
$$W_n = \sqrt{\frac{n^2 D^4 h_T}{\kappa}} \quad (3)$$

که در آن k موینگگی^۵ سینماتیکی سیال آب است.

فرمول‌های ریاضی

۱. هندسه‌ی پروانه

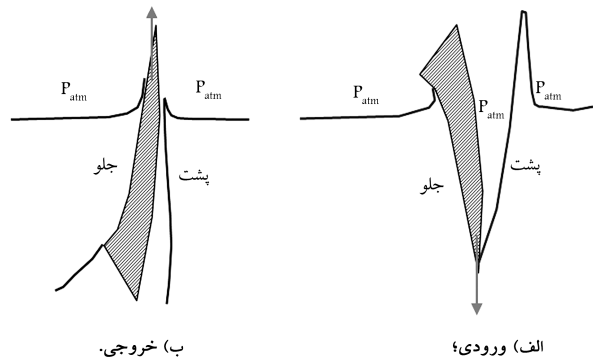
در شکل ۳ سیستم مختصات پروانه‌ی نیمه‌مغروق نشان داده شده است. پروانه در جهت عقربه‌ی ساعت و با سرعت زاویه‌ی ثابت (ω) در جریان غیرویسکوز، غیرقابل تراکم و غیرچرخشی عمل می‌کند. سیستم مختصات دکارتی $O - xyz$ با مبدأ O در مرکز پره ثابت می‌شود، محور x منطبق بر محور پروانه و جهت آن به سمت پایین دست در نظر گرفته می‌شود. محور z در جهت بالا مثبت است و محور y سیستم



شکل ۳. سیستم مختصات شافت و پروانه.

جدول ۱. ابعاد اصلی پروانه‌ی نیمه‌مغروق.

نوع پروانه	SSP-۱۰۱	SPP-۱۰۲
پارامتر		
قطر (متر)	۰٫۲۰	۰٫۶۲
نسبت شعاع تویی به شعاع پروانه (r_h/R)	۰٫۲	۰٫۲
تعداد پره‌ها (Z)	۳	۵
نسبت سطح گسترش‌یافته (AE/A_0)	۰٫۵۰	۰٫۷
نسبت گام (P/D)	۱٫۶	Various
زاویه اسکیو (درجه)	۰	۳۰٫۰
زاویه ریک (درجه)	۱۰٫۰	۱۰٫۰
نوع مقطع پره	SC	Modified SC



شکل ۴. شرایط جریان در لحظه‌ی ورود و خروج پره از سطح آب.

که در آن \vec{n} بردار یک‌ه‌ی عمود بر سطح و \vec{V}_{in} سرعت جریان ورودی به پروانه است. سرعت جریان ورودی از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$\vec{V}_{in} = \vec{V}_A + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (9)$$

\vec{V}_A سرعت پیشروی و $\vec{\omega} (= 2\pi n)$ سرعت زاویه‌ی پروانه است.

(ب) شرط دینامیکی: اگر در نقطه‌ی از سطح پره افت فشار داشته باشیم و این فشار کم تر از فشار بخار اشباع شود، کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. حال اگر این افت فشار در نزدیکی سطح باشد به‌جای کاویتاسیون هوادهی صورت می‌گیرد که در شرایط هوادهی کامل، فشار در پشت پره برابر فشار اتمسفر است (شکل ۵) لذا خواهیم داشت:

$$At \text{ ventilate surface} : p = p_{atm} \quad (10)$$

(ج) شرط مرزی کاتا: این شرط بیان می‌کند که فشار در دو لبه‌ی انتهایی^۶ سطح جلویی و عقبی پره یکسان است.

$$\Delta C_P|_{TE} = 0 \Rightarrow C_P^B|_{TE} - C_P^F|_{TE} = 0 \quad (11)$$

که در آن اندیس‌های F و B به‌ترتیب معادل $Face$ و $Back$ است.

ITTC محاسبه می‌شود.^[۸] بعد از مشتق‌گیری پتانسیل سرعت و استفاده از معادله‌ی برنولی، فشار وارده بر سطح پره به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ بیان می‌شود:

$$p = 0.5\rho(2\nabla\phi_{in} \cdot \nabla\phi - \nabla\phi \cdot \nabla\phi) \quad (12)$$

نیروی تراست و گشتاور کل نیز از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$T = \int_S p n_x ds + T_F, \quad Q = \int_S p(n_y z - n_z y) ds + Q_F, \quad (13)$$

که در آن T_F و Q_F به‌ترتیب تراست و گشتاور ناشی از گران‌روی سیال آب هستند. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه (K_t, K_q, η) چنین تعریف می‌شوند:

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^5}, \quad K_q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta = \frac{K_t J}{K_q 2\pi}. \quad (14)$$

نتایج محاسبات

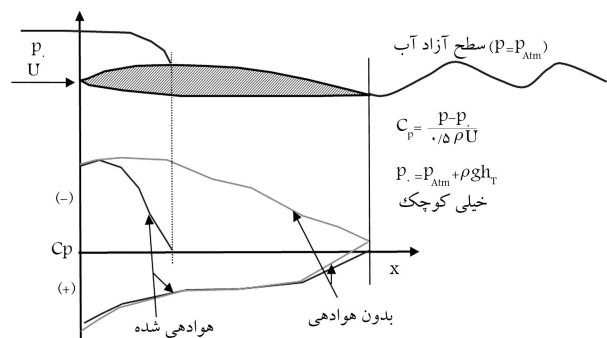
به‌منظور معتبرسازی نتایج عددی، دو پروانه در این محاسبات در نظر گرفته شده است. پروانه‌ی اول ۳ پره‌ی (SPP۱۰۱) و پروانه‌ی دوم ۵ پره‌ی (SPP۱۰۲) است. پروانه‌ی SPP۱۰۱ در ژاین آزمایش شده است.^[۹] ابعاد اصلی پروانه‌ی مذکور در جدول ۱ داده شده است.

۱. محاسبات برای پروانه ۳ پره‌ی (SPP۱۰۱)

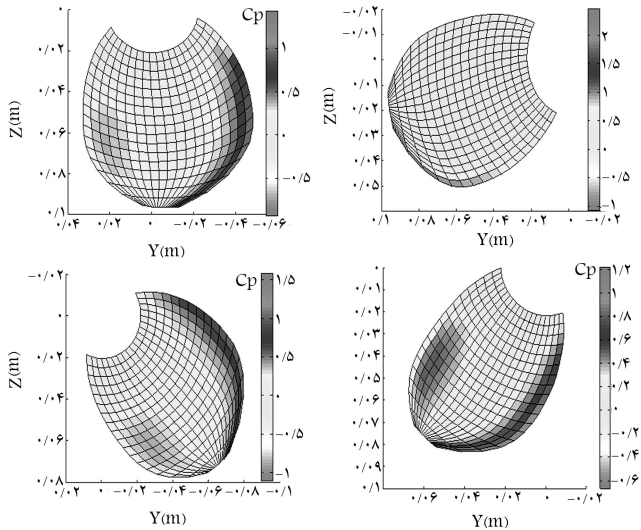
قطر این پروانه ۰٫۲۰ متر، بدون اسکیو و زاویه‌ی ریک ۱۰ درجه است. شکل ۶ المان‌بندی پروانه‌ی ۳ پره‌ی را نشان می‌دهد. هر پره به تعداد ۴۳۲ المان تقسیم شده، که تعداد کل المان‌های پروانه با هاب (Hub) برابر ۲۲۰۰ المان است. شکل ۷ پروفیل و مقطع پره در شعاع‌های مختلف را نشان می‌دهد. ضریب بی‌بعد فشار و ضرایب هیدرودینامیکی یک پره در مراحل مختلف یک چرخه‌ی دوران به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. ضرایب هیدرودینامیکی این پروانه در دو شرایط سطحی و عمقی با نسبت گام به قطر برابر ۱٫۶ در مقایسه با نتایج تجربی

۳. نیروهای هیدرودینامیکی

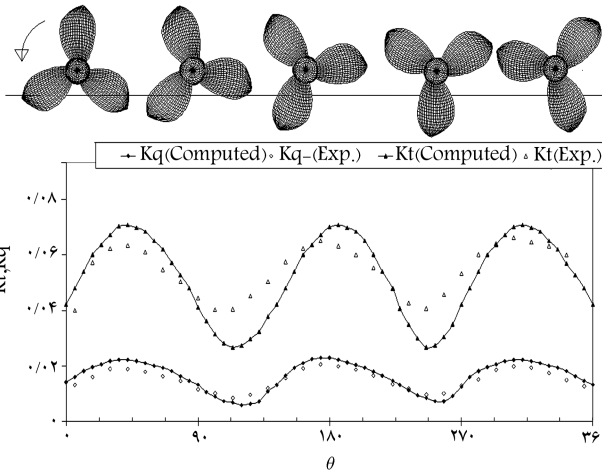
نیروهای تراست و گشتاور با استفاده از نیروهای فشاری و برشی وارده بر سطح محاسبه می‌شوند. مؤلفه‌ی فشاری از روش المان مرزی یعنی با مشتق‌گیری از رابطه‌ی پتانسیل (معادله‌ی ۷) به دست می‌آید. اما مؤلفه‌ی نیروی اصطکاکی از روش تجربی



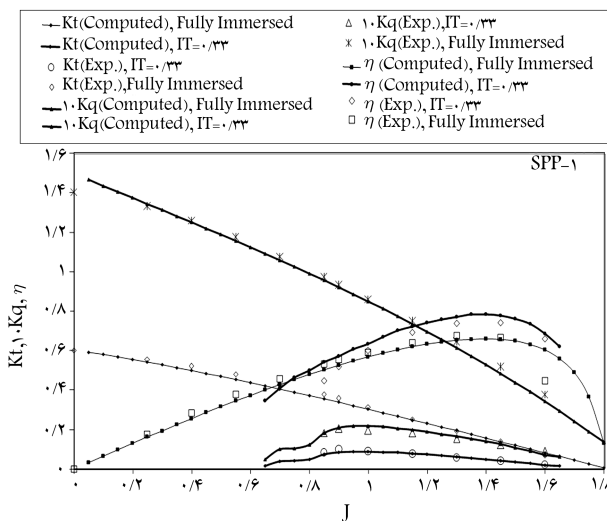
شکل ۵. شرایط هوادهی در فویل و توزیع فشار در منطقه هوادهی و بدون هوادهی.



شکل ۸. توزیع فشار روی سطح پره در چهار حالت از لحظه‌ی غوطه‌وری تا بیرون آمدن از سطح آزاد آب پروانه SPP ۱۰۱، $P/D=1/6$ ، $J=1/2$.



شکل ۹. عملکرد هیدرودینامیکی یک پره در یک سیکل دوران از پروانه نیمه‌مغروق SPP ۱۰۱.

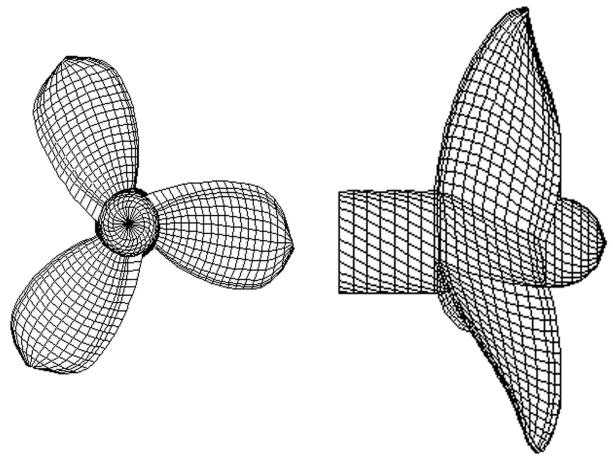


شکل ۱۰. مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی تحلیلی و تجربی در دو شرایط نیمه‌مغروق و مغروق SPP ۱۰۱.

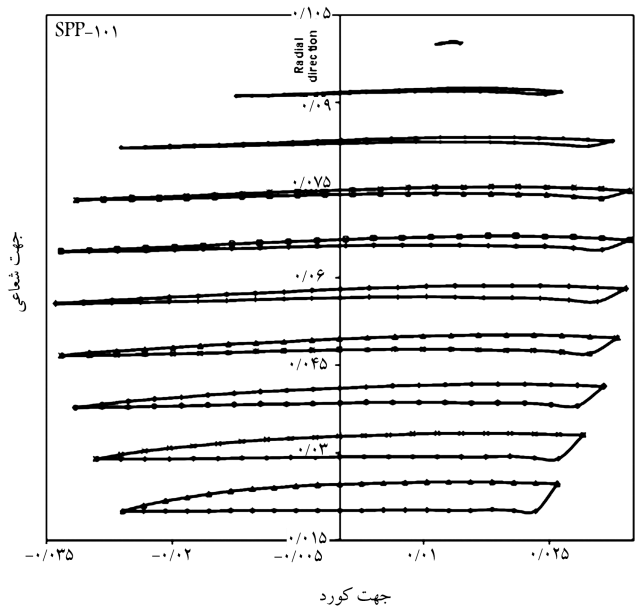
در شکل ۱۰ نیز نشان شده است. این نتایج محاسبه‌شده نشان می‌دهد که با نتایج تجربی مطابقت دارد. کارایی پروانه در شرایط نیمه‌مغروق بیشتر از شرایط مغروق است. منطقه‌ی گذرا در این منحنی $J_{CR} = 0.84$ را نشان می‌دهد. در منطقه‌ی هواده‌ی کامل (یعنی $J_{CR} < 0.84$) ضرایب هیدرودینامیکی کاهش می‌یابند. مقایسه‌ی نتایج محاسبه‌شده با نتایج تجربی نشان می‌دهد که محاسبات رضایت‌بخش است.

۲. محاسبات برای پروانه‌ی ۵ پره‌یی (SPP ۱۰۲)

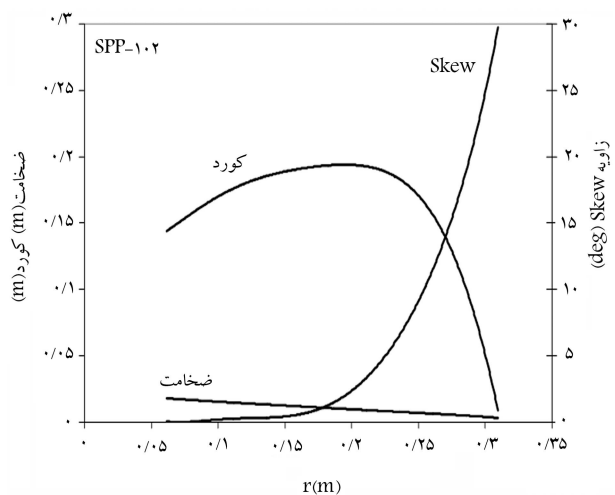
قطر این پروانه ۰/۶۲ متر، زاویه‌ی اسکيو ۳۰ درجه، و زاویه‌ی ریک ۱۰ درجه است. در شکل ۱۱ پروفیل و مقطع پره از ریشه تا نوک نشان داده شده است. همچنین المان‌بندی پروانه در شکل ۱۲ مشخص است. تغییرات طول کورد، اسکيو، نسبت گام و ضخامت برحسب شعاع در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشخصات هیدرودینامیکی پروانه در دو شرایط غوطه‌وری کامل و در شرایط نیمه‌غوطه‌وری $I_T = h_T/D = 0.4$ در شکل ۱۳ آورده شده است. منطقه‌ی گذرا در این منحنی



شکل ۶. المان‌بندی پروانه‌ی ۳ پره‌یی SPP ۱۰۱.



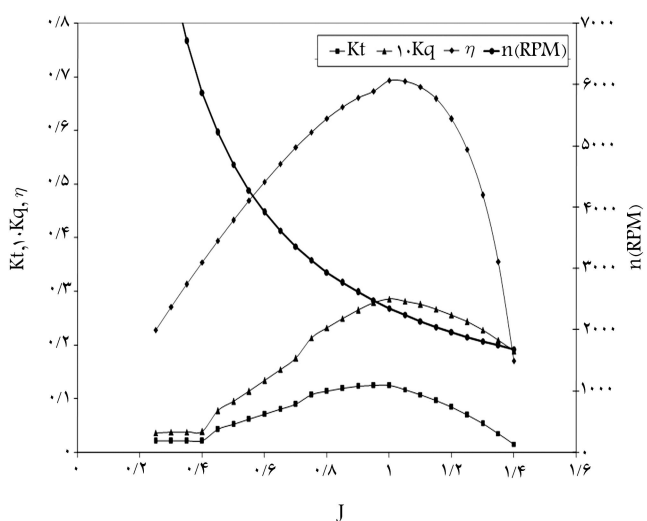
شکل ۷. پروفیل و مقطع پره پروانه‌ی نیمه‌مغروق SPP ۱۰۱.



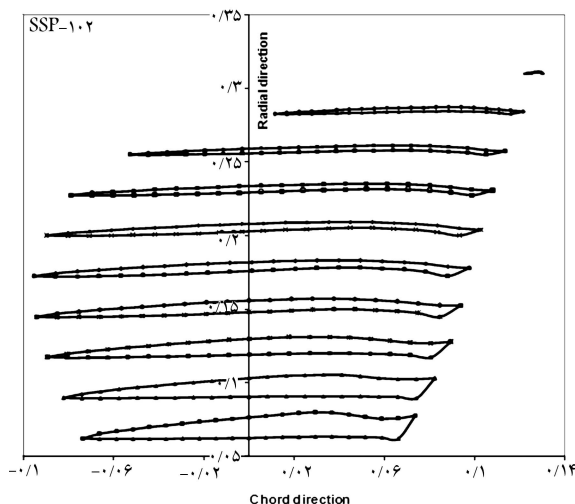
شکل ۱۳. تغییرات طول کورده، اسکویو، نسبت گام و ضخامت بر حسب شعاع پروانه SPP ۱۰۲.

$J_{CR} = 0.8$ را نشان می‌دهد. در منطقه‌ی هواده‌ی کامل (یعنی $J_{CR} < 0.8$) ضرایب هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد. اگرچه کارایی در شرایط نیمه‌غوطه‌وری کامل نسبت به غوطه‌وری ۲٪ کاهش می‌یابد، گشتاور ۵۵٪ کم‌تر شده و این باعث می‌شود که به موتور با قدرت کم‌تری نیاز داشته باشیم. از طرفی تراست لازم برای غلبه بر مقاومت در سرعت طراحی ۶۰ گره دریایی در شرایط نیمه‌غوطه‌وری کافی است. علاوه بر این شیب محوری شافت نیز کاهش می‌یابد. همچنین عملکرد هیدرودینامیکی آن در $P/D = 1.6$ و تغییرات سرعت دورانی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نقطه‌ی گذرا در این حالت تقریباً برابر $J = 1$ است. سرعت طراحی تقریباً در منطقه‌ی هواده‌ی کامل $J = 0.8$ یعنی سرعت دورانی برابر ۳۰۰۰ است.

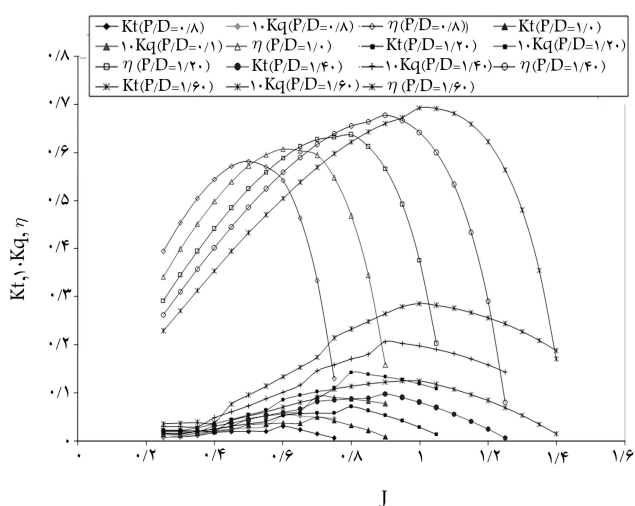
شکل ۱۵ ضرایب هیدرودینامیکی پروانه‌ی نیمه‌مغروق در گام‌های (P/D) مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت گام هر سه پارامتر یعنی (K_t, K_q, η) برحسب نسبت سرعت پیشروی (J) نیز افزایش می‌یابد. در این محاسبات زاویه‌ی شیب محوری ۶ درجه و نسبت ارتفاع غوطه‌وری برابر $I_T = 0.4$ در نظر گرفته شده است.



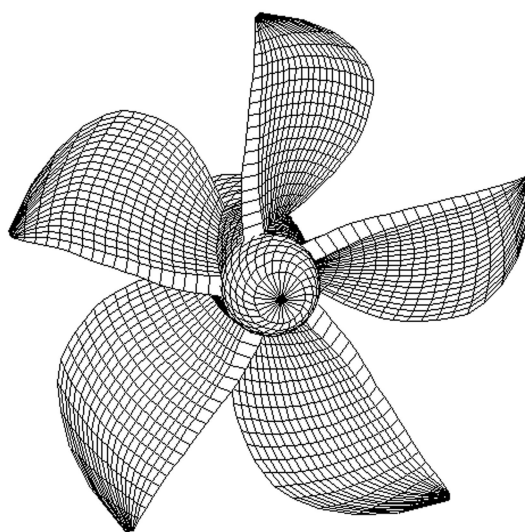
شکل ۱۴. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نیمه‌مغروق SPP ۱۰۲ در $P/D = 1.6$ و تغییرات سرعت دورانی.



شکل ۱۱. پروفیل و مقطع پره پروانه نیمه‌مغروق SPP ۱۰۲.



شکل ۱۵. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نیمه‌مغروق SPP ۱۰۲ در P/D های مختلف.



شکل ۱۲. المان بندی پروانه ۵ پره‌ی SPP ۱۰۲.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار بررسی و محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نیمه‌مغروق با استفاده از روش المان مرزی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی خاص انجام شده است. از محاسبات به دست آمده نتایج ذیل حاصل شده است:

۱. اثر عدد وبر و نسبت گام روی JCR بسیار مهم است و تقسیم سه منطقه (گذرا، هوادهی کامل و بدون هوادهی) از روی این سه پارامتر مشخص می‌شود. نقطه‌ی گذرا برای پروانه‌ی نیمه‌مغروق در محدوده‌ی $1/1 < J < 0.7$ است. این نقطه‌ی گذرا مبین تغییر فاز سیال آب به هوا در ناحیه‌ی پشت پروانه است.

۲. با کاهش نسبت گام ضریب بحرانی کاهش و اثر سطح آزاد کم‌تر می‌شود، و از فاز هوادهی جزئی به فاز هوادهی کامل تغییر می‌یابد.
۳. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه‌ی SPP 101 با نتایج تجربی مقایسه شده است و نتایج محاسبات مطلوب و رضایت‌بخش است. بیشترین کارایی این پروانه در محدوده‌ی 0.7 است.
۴. نتایج محاسبات برای پروانه SPP- 102 در گام‌های مختلف نیز انجام شده است. کارایی این پروانه کم‌تر از پروانه‌ی ۳ پره‌ی است. به نظر می‌رسد علت آن زاویه‌ی اسکپو زیاد و تعداد پره‌های بیشتر است. به هر حال این نتایج نشان می‌دهد که تمایل و شباهت زیادی با عملکرد هیدرودینامیکی پروانه‌های نیمه‌مغروق دارد ولی بررسی بیشتر نیاز به آزمایش‌های واقعی دارد.

پانویس

1. surface piercing propeller (SPP)
2. advance velocity ratio
3. ventilated
4. planing
5. capillarity
6. trailing edge (TE)

منابع

6. Rose, C.J.; Claus, F.L. Kruppa, and Kourosh Koushan. "Surface piercing propellers, propeller/hull interaction", FAST'93 (1993).
7. Kruppa, F.L.; Claus, Rose, and John, C. "Methodical series model test results", FAST'91.
8. Olofsson, N. "Force and flow characteristics of a partially submerged propeller doctoral thesis", Goteborg: Chalmers University of Technology – Department of Naval Architecture and Ocean Engineering (1996).
9. Nozawa, K., and Takayama, N. "Experimental study on propulsive performance of surface piercing propeller", *KSNAJ*, **218**, (2002).
10. Himei, K.; Yamasaki, S.; Yamasaki, M., and Kudo, T. "A study of practical supercavitating propeller", *The west-Japan society of naval architects*, **76** (2005).
11. Young, Y.L., and Kinnas, S.A. "Analysis of supercavitating and surface-piercing propeller flows via BEM", *Computational Mechanics*, **32**, pp. 269-280 (2003).
12. Alexander, V. Pustoshny; Valery Bointsov; Eduard P. Lebedev, and Anton A. Stroganov. "Development of 5-blade SPP series for fast speed boat", Ninth international Conference on Fast Sea, Shanghai (2007).
13. Ghassemi, H., and Ghiasi, M. "Hydrodynamic characteristics of the surface piercing propeller (SPP) by using special practical and numerical approach", *8th Int. conf. on hydrodynamics (ICHHD)*, France (2008).
14. Ghassemi, H. "Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planing craft", *Journal of Marine Science and Application*, **8**(4) (2009).
۱۵. قاسمی، حسین؛ قصابزاده، مرتضی؛ نظری، ابوالفضل. «استفاده از روش المان مرزی برای تحلیل هیدرودینامیکی پروانه نیمه‌مغروق»، یازدهمین همایش صنایع دریایی (MIC ۲۰۰۹)، جزیره کیش، آبان ماه ۱۳۸۸.