

## تحلیل عددی اثر توپی بر عملکرد پروانه شناور و استفاده از PBCF برای یکسان‌سازی سرعت‌های القایی در جریان پایین دست

حسن قاسمی<sup>۱</sup>، امین مردان<sup>۲</sup> و احسان یاری<sup>۱</sup>

۱. دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۲. دانشکده علوم و مهندسی دریایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۰۳/۲۸)

چکیده - :

-

-

واژگان کلیدی:

---

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: gasemi@aut.ac.ir

# Numerical Analysis of Hub Effect on Marine Vehicle Propeller Performance and Using PBCF to Equalize Its Induced Velocity Downstream

H. Ghassemi<sup>1</sup>, A. Mardan<sup>2</sup> and E. Yari<sup>1</sup>

1. Department of Ocean Engineering, Amirkabir University of Technology  
2. Department of Marine Engineering, Maleke-Ashtar University of Technology

**Abstract:** In this article, the boundary element method (BEM) is used to analyse the propeller hub and the blades in its vicinity. In solver, the modeling of hub and blades is performed with source and dipole distribution on their surfaces. Iterative procedure is utilized to consider the near body effect. In each step, each body was independently analyzed with the influence of near body considered in inflow velocity. The induced velocity of propeller was studied with and without PBCF (Propeller Boss Cap Fin) downstream. PBCF, as an energy-saving device, causes the induced velocity of propeller to be reduced and uniformed.

**Keywords:** Propeller Hub, Boundary element method (BEM), Induced Velocities, PBCF.

راندمان پروانه	$\eta$	بردار عمود بر سطح	$\vec{n}$
ضرایب اصطکاک روی سطح پروانه در نقطه $p_i$	$C_f(p_i)$	برایند سرعت پیشروی و سرعت دورانی پره	$V_I$
ضرایب تاثیر چشمه	$S_{ij}$	پتانسیل سرعت	$\phi$
ضرایب تاثیر دوقطبی روی پره	$D_{ij}$	تابع گرین	$G$
ضرایب تاثیر دوقطبی روی ویک	$W_{ij}$	تبدیل ژاکوبین	$J$
ضرایب تاثیر سرعت چشمه	$\nabla_p S_{ij}$	تعداد پره‌ها	$Z$
ضرایب تاثیر سرعت چشمه	$\nabla_p S_{ij}$	توابع شکل	$Q_i$
ضرایب تاثیر سرعت دوقطبی روی پره	$\nabla_p D_{ij}$	تعداد نقاط میدانی	$N_o$
ضرایب تاثیر سرعت دوقطبی روی ویک	$\nabla_p W_{ij}$	تراست کل پروانه	$T$
ضریب اصطکاک ویسکوز در شعاع $r$	$C_{fr}$	سرعت در بالادست جریان	$U_\infty$
ضریب پیشروی پروانه	$J$	سرعت دورانی پروانه	$n$
ضریب تراست پروانه	$K_T$	سرعت مماسی کل روی سطح پروانه	$\vec{V}_t$
ضریب فشار بی‌بعد روی سطح پروانه در نقطه $p_i$	$C_p(p_i)$	سرعت یک نقطه میدانی	$v_i$
ضریب گشتاور پروانه	$K_Q$	سطح پره	$S_B$
عدد رینولدز در شعاع $r$	$Rn$	سطح دنباله	$S_W$
قطر پروانه	$D$	سطح کنترل خارجی	$S_\infty$
گام در هر شعاع	$P$	شعاع بی‌بعد	$x$
گردش (سیرکولاسیون)	$\Gamma$	شعاع پروانه	$R$
گشتاور کل پروانه	$Q$	شعاع توپی	$r^n$
مختصات نقطه چشمه	$Q$	طول کورد در هر شعاع	$C$
مختصات نقطه کنترلی	$P$	فاصله میان نقطه چشمه و نقطه کنترلی	$P$

$\Delta S_i$	مساحت هر جزء	$T_{vis}$	مولفه‌های ویسکوز تراست پروانه
$Q_{pot}$	مولفه پتانسیل گشتاور پروانه	$Q_{vis}$	مولفه‌های ویسکوز گشتاور پروانه
$T_{pot}$	مولفه پتانسیل تراست پروانه		

## ۱- مقدمه

پروانه معمولاً در پاشنه شناور قرار می‌گیرد. به علت ایجاد لایه مرزی و شکل پیچیده پاشنه شناور، میدان جریان ورودی به پروانه یک میدان جریان دنباله<sup>۱</sup> نایک‌نواخت است. لازمه تحلیل عددی پروانه، داشتن میدان جریان دنباله پاشنه شناور است. هر شناور با توجه به شکل و فرم خاص بدنه دارای میدان دنباله مختص خود است. امروزه با استفاده از معادلات حاکم بر جریان سیال در علم هیدرودینامیک و روش‌های عددی پیشرفته در دینامیک سیالات محاسباتی، میدان دنباله پاشنه شناور قابل استخراج است. با توجه به اینکه پروانه جزو سطوح برآ<sup>۲</sup> و یا جلوبر (پیش‌برنده) است نیروی فشاری در مقایسه با نیروی برشی غالب است. لذا، با استفاده از مدل‌سازی مناسب و روش اجزای مرزی برای تحلیل پروانه و توپی می‌توان به نتایج قابل قبولی در مقایسه با داده‌های تجربی دست یافت.

پروانه فین دار<sup>۳</sup> متشکل از تعدادی پره، توپی و فین است. استفاده از فین در انتهای توپی پروانه<sup>۴</sup> باعث از بین بردن گردابه<sup>۵</sup> توپی می‌شود. گردابه توپی حاوی حباب بخار (کاویتاسیون) بوده و سبب کاهش راندمان پروانه و خوردگی در سکان<sup>۶</sup> می‌شود.

تاکنون روش‌های متعددی برای تحلیل و طراحی پروانه ارائه شده است؛ که می‌توان کد طراحی پره پروانه MIT's SPBD10 و کد تحلیل نیروهای وارد بر پروانه در حالت پایا PSF2 را نام برد [۱]. یکی از موضوعات مهم در طراحی پروانه اثر اندازه توپی بر عملکرد پروانه و ضرایب هیدرودینامیکی است. برای پروانه‌هایی که توپی بزرگی دارند (مانند پروانه با گام قابل کنترل<sup>۷</sup>) توپی می‌تواند اثر قابل توجهی بر عملکرد پروانه داشته باشد. در سال ۱۹۷۸، وایند<sup>۸</sup> معیاری را برای حداقل اندازه توپی از نظر سازه‌ای ارائه کرد و پیش‌بینی

کرد که راندمان، تقریباً متناسب با کاهش سطح دیسک پروانه کاهش می‌یابد [۲]. از نظر هیدرودینامیکی توپی بزرگتر اثر بیشتری روی پره‌ها دارد و بنابراین ضروری است که توپی، در فرایند طراحی مدنظر قرار گیرد.

هس<sup>۹</sup> برای مدل‌سازی پره، توزیع چشمه و دوقطبی و برای مدل‌سازی توپی توزیع چشمه را به کار برد. در مطالعه مذکور، از "انتقال نیروی لیفت" از محل تقاطع پره با توپی به محور چرخش استفاده شده است که به معنی شیب صفر سیرکولاسیون در توپی است؛ گردابه توپی در امتداد محور چرخش شکل می‌گیرد و قدرت گردابه برابر جمع قدرت دو-قطبی‌های منتقل شده از تمام پره‌هاست [۳ و ۴].

در سال ۱۹۹۱، گلگ<sup>۱۰</sup> با بررسی نویز ناشی از بارگذاری در حالت پایدار نشان داد که اثر توپی در سطح نویز انتشاری پروانه در دوردست بسیار قابل توجه است [۵]. در تحقیقی بر روی پروانه با گام قابل کنترل در سال ۱۹۹۲ نشان داده شد که علاوه بر توزیع فشار در مقاطع نزدیک به ریشه پره، عملکرد پروانه نیز در حالت آب آزاد تحت تاثیر توپی قرار می‌گیرد [۶]. طبق نتایج لیو<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۹۵ در توپی‌های معمولی که قطر کمی دارند و بیشتر در پروانه‌های گام ثابت و شناورهای سطحی استفاده می‌شوند، اثر توپی روی نیروهای هیدرودینامیکی پروانه مانند تراست و گشتاور چندان قابل توجه نیست [۷]. در ادامه در سال ۲۰۰۹، کای<sup>۱۲</sup> الگوریتم کوپل را برای تحلیل پروانه‌های نازل‌دار با در نظر گرفتن اثر توپی مورد استفاده قرار داد [۸].

در سال ۱۹۸۰، تجهیزات هیدرودینامیکی کاهنده اتلاف انرژی به صورت گسترده وارد صنعت دریایی شد. این ابزارها از لحاظ موقعیت جانمایی و نصب به سه دسته تقسیم می‌شوند [۹]:

- تجهیزاتی که روی بدنه شناور نصب می‌شوند.
- ابزارهایی که روی پروانه قرار می‌گیرند.

• وسایلی که در پایین دست جریان قرار می گیرند.

فین های انتهایی توپی جزء دسته دوم بوده و روی قسمت انتهایی توپی نصب می شوند. ایده قرار دادن این فین ها، اولین بار توسط اوچیچی<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۸۸ و با هدف افزایش راندمان و کاهش اتلاف انرژی ناشی از تشکیل گردابه توپی ارائه شد. این گردابه حاوی حباب بخار است که در اثر ترکیدن این حباب ها نویز، خوردگی و ارتعاشات در سیستم ایجاد می شود. این فین ها با ضعیف کردن قدرت گردابه های جاری شده روی توپی، باعث بازیابی انرژی جنبشی ناشی از چرخش جریان می شوند.

اکثر تحقیقات تجربی و عددی مربوط به فین های انتهایی توپی برای کاهش مصرف سوخت و افزایش راندمان در شناورها انجام گرفته است. نتایج کارهای تحقیقاتی مهمی که توسط اوچیچی بین سال های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۲ بر روی فین های انتهایی توپی صورت گرفته است به شرح زیرند:

[۱۳-۱۰]

- کاهش ۳ تا ۶ دسی بل در سطح نویز انتشاری پروانه
- افزایش ۲ الی ۶ درصد در راندمان پروانه
- امکان استفاده از گام بالاتر در ریشه ی پره
- ۴٪ صرفه جویی در مصرف سوخت شناور

طبق گزارش جانگل ویتز<sup>۱۴</sup> در سال ۱۹۹۶، استفاده از فین های انتهایی توپی باعث کاهش گردابه توپی شده و در نتیجه ۲ تا ۵ درصد راندمان را افزایش داده است. [۱۴].

در مطالعه ی حاضر، در بررسی تاثیر توپی و پره ها بر روی هم از یک فرایند تکراری<sup>۱۵</sup> استفاده شده است؛ بدین صورت که در هر مرحله توپی و پره ها به صورت مجزا و با در نظر گرفتن اثر جسم مجاور در شرایط جریان ورودی مورد تحلیل قرار می گیرد. برای مدل سازی توپی و پره ها در معادلات از توزیع چشمه و دوقطبی روی سطوح آنها استفاده شده است. در ادامه تحلیل ارائه شده، به بررسی وجود این فین ها در اثرات القایی پروانه در جریان پایین دست پرداخته شده است. سپس با تغییر دو پارامتر هندسی یعنی زاویه نصب فین روی انتهایی توپی و اختلاف فاز بین پروانه و فین، عملکرد فین های انتهایی توپی

مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر قطر و زاویه مخروطی توپی که بین طراح هیدرودینامیک بدنه و طراح رانش و پروانه به عنوان یک نقطه مشترک تعریف می شود، مورد تحلیل قرار می گیرد. نوآوری که در این مقاله نسبت به کارهای دیگر مشهود است، استفاده از اثرات القایی به جای استفاده از ماتریس کوپل و در نتیجه کوچک کردن ماتریس های حل است که سبب کاهش محاسبات و افزایش دقت محاسباتی می شود.

## ۲- هندسه و مدل سازی پروانه

### ۲-۱- مدل سازی هندسی پره ها

هر نقطه مانند p روی سطح پره و مختصات محلی (xp, yp) و (zp) با استفاده از معادله (۱) به صورت زیر تعریف می شود [۹].

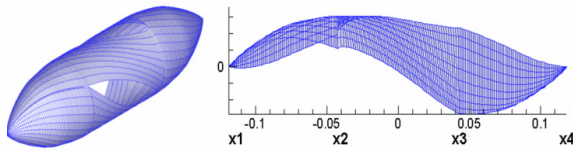
$$\begin{cases} x_p = -[i_G + r\theta_S \tan(\theta_{nt})] + (0.5 - x_c) \sin(\theta_{nt}) + y_{U,L} \cos(\theta_{nt}) \\ y_p = r \sin \left[ \theta_S - \frac{180[(0.5 - x_c) \cos(\theta_{nt}) - y_{U,L} \cos(\theta_{nt})]}{\pi r} \right] \\ z_p = r \cos \left[ \theta_S - \frac{180[(0.5 - x_c) \cos(\theta_{nt}) - y_{U,L} \cos(\theta_{nt})]}{\pi r} \right] \end{cases} \quad (1)$$

برای تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی از ماتریس تبدیل، معادله (۲)، به صورت زیر استفاده می کنیم.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

### ۲-۲- جریان گردابه دنباله ای

جریان گردابه دنباله ای که برای اصلاح سرعت در لبه فرار<sup>۱۶</sup> پره به کار می رود در حالت فواصل مساوی مدل سازی شده و میزان پیشروی دنباله در پایین دست جریان، معمولاً معادل با پیشروی پروانه به اندازه ۲ یا ۳ دور چرخش در نظر گرفته می شود. در این مطالعه، ناحیه گذار<sup>۱۷</sup> و روی هم جمع شدن



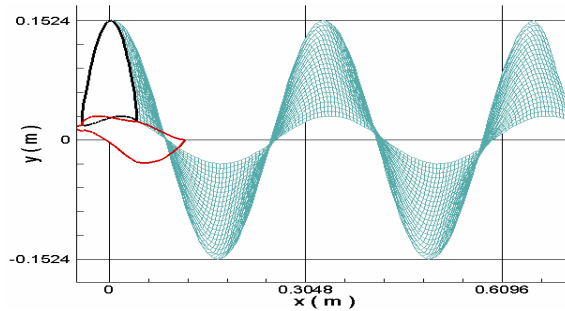
شکل ۲- مدل سازی هندسه توپیی

هندسه توپیی را با پنج پارامتر  $r_H$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  و  $x_4$  می توان کنترل کرد.  $r_H$  حداکثر شعاع توپیی است. بازه بین  $x_2$  و  $x_3$  شعاع توپیی ثابت و برابر  $r_H$  است. در بازه بین  $x_3$  و  $x_4$  یک تابع درجه سوم استفاده شده است که بهترین انطباق را با توپیی واقعی دارد. بازه بین  $x_1$  و  $x_2$  یک هندسه مصنوعی با هدف تعریف یک پروفیل بسته برای توپیی است. شکل (۲) مدل سازی هندسه توپیی را نشان می دهد.

در تشکیل توپیی مخروطی، یک مخروط ناقص از لبه جلویی پره شروع به برش دادن آن به سمت بالادست جریان می کند و لذا شعاع متوسط توپیی در اثر اعمال شیب، افزایش یافته و بخشی از سطوح برآ (پره) از بین می رود. در شکل (۳)، تغییرات اعمال شده روی توپیی و پره، قبل و پس از اعمال زاویه  $10^\circ$  درجه نمایش داده شده است. اگر تعداد پره ها  $Z$  در نظر گرفته شود، با توجه به یکسان بودن شرایط جریان در تحلیل پایا،  $1/Z$  توپیی مورد تحلیل قرار می گیرد. مش روی توپیی مانند مش دنباله در مختصات استوانه ای شکل می گیرد و در نهایت به مختصات دکارتی تبدیل می شود.

#### ۲-۴- مدل سازی فین های انتهای توپیی

تحقیقات نشان می دهد که عملکرد پروانه در ناحیه اطراف قسمت انتهایی توپیی کاهش می یابد. گردابه های تشکیل شده روی توپیی پروانه راندمان را کاهش می دهند. قدرت این گردابه ها بستگی به توزیع بارشعاعی روی پروانه و هندسه توپیی دارد. طبق تحقیقات به عمل آمده فین های نصب شده روی توپیی



شکل ۱- مدل سازی یک در انتهای یک پره

دنباله مدل سازی نشده است. در فرمول بندی دنباله، مختصات هر نقطه در دستگاه استوانه ای تعریف شده و از طرفی وابسته به مختصات نقطه ما قبل آن خواهد بود. معادله ارائه شده، هندسه دنباله در هر نوار شعاعی  $(r)$  را تعریف می کند.

$$\text{po int}_i = \frac{[\text{po int}_U + \text{po int}_L]_{\text{Trailing E deg}}}{2} \quad (3)$$

$$\text{po int}_i(1) = \text{po int}_{i-1}(1) + \frac{P}{2m} \times \text{coeff.}$$

$$\text{po int}_i(2) = r$$

$$\text{po int}_i(3) = \text{po int}_{i-1}(3) + \text{coeff.}, \quad i = 2, 3, 4, \dots, n$$

در فرمول بندی جریان دنباله، ضرایب  $n$  و  $\text{coeff}$  میزان پیشروی جریان سیال در پشت پروانه را تعیین می کنند. آنچه که در شکل (۱) نمایش داده شده، شکل گیری دنباله ای است که به آن دنباله کلاسیک خطی گفته می شود. از آنجا که از اختلاف پتانسیل بین سطوح دنباله صرف نظر شده است، ضخامت آن صفر در نظر گرفته می شود.

#### ۲-۳- مدل سازی توپیی

هندسه توپیی را می توان با استفاده از معادله (۴) به صورت زیر ارائه کرد [۱۵].

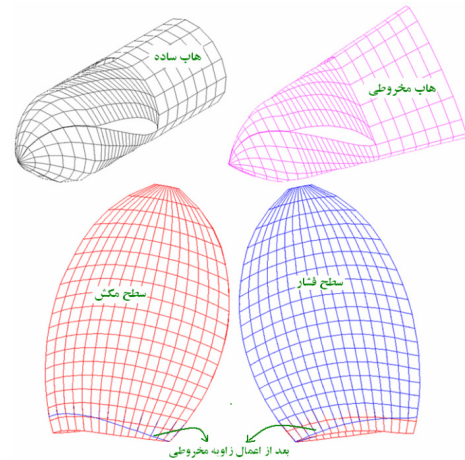
$$r_h(x) = a(x-b)^3 + r_H \quad (4)$$

$$a = \frac{r_H}{(x_2 - x_1)^3}, \quad b = x_2, x_1 \leq x \leq x_2$$

$$a = 0, \quad r_h = r_H, x_2 \leq x \leq x_3$$

$$a = -\frac{r_H}{(x_4 - x_3)^3}, \quad b = x_3, x_3 \leq x \leq x_4$$

د: لبه جلویی فین‌ها مابین ریشه دو پره مجاور قرار می‌گیرد. در این مقاله، با در نظر گرفتن موارد فوق الذکر، دقت لازم در مدل سازی فین‌ها صورت گرفته است. شکل (۴) مدل سازی فین‌های انتهایی توپی به همراه دنباله را نشان می‌دهد. تعداد مش‌های کل پروانه عبارت است از تعداد مش‌های روی پره‌ها، توپی و فین‌هاست. مطابق شکل (۴) برای یک پروانه ۴ پره‌ای با ۴ تا فین، تعداد کل مش‌ها در حدود ۸۵۰۰ جزء سطحی است که ۲۴۰۰ جزء برای پره‌های پروانه، ۲۴۰۰ جزء برای فین‌ها و ۳۵۰۰ جزء برای توپی است.



شکل ۳- مقایسه پره و توپی، قبل و بعد از اعمال زاویه مخروطی

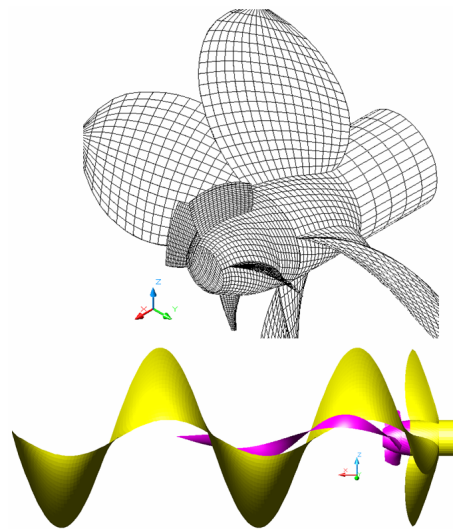
## ۲-۵- مشخصات هندسی پروانه و فین

پارامترهای اصلی پروانه و فین در جداول (۱) و (۲) نمایش داده شده است. پارامترهای هندسی فین‌ها بر مبنای توصیه‌های مطرح شده در بخش (۲-۴) تعیین شده‌اند [۱۰].

## ۳- معادلات حاکم و روش حل

### ۳-۱- جریان پتانسیل و شرایط مرزی حاکم

با فرض اینکه جریان در میدان حل خارجی حول جسم به اندازه کافی و موثر غیر ویسکوز<sup>۱۸</sup>، تراکم ناپذیر و غیر چرخشی<sup>۱۹</sup> باشد، در حالت جریان پایا سرعت اغتشاشی<sup>۲۰</sup> در کلیه میدان حل به استثنای سطوح ناپیوسته میدان سرعت که تشکیل دنباله سطح بالابر از جسم را می‌دهند غیرچرخشی است. به عبارت دیگر برای استفاده از معادله لاپلاس برای مدل کردن جریان سیال حول پروانه باید جریان در کلیه نقاط میدان به جز یک سری نقاط ناپیوستگی، که دنباله پروانه جایگزین آنها می‌شود، غیر چرخشی باشد. در حالت جریان ورودی نایکنواخت مانند حالت ویسکوز یا جریان دنباله پشت شناور فرض بر این است که قسمت چرخشی سرعت اغتشاشی به همراه گردابه‌ی اغتشاشی<sup>۲۱</sup> مربوط به سیال در میدان سرعت  $V_\infty$ ، که در متون هیدرودینامیک شناور به عنوان دنباله موثر<sup>۲۲</sup> شناور شناخته شده است، در نظر گرفته شده است. بنابراین با در نظر



شکل ۴- مدل فین‌های انتهایی توپی به همراه دنباله

باعث حذف کاویتاسیون گردابی توپی می‌شوند که در نتیجه نویز هیدروآکوستیکی را از بین می‌برند [۱۵]. علاوه بر این راندمان پروانه را به‌خصوص در پروانه‌های گام متغیر افزایش می‌دهد. در زیر به بررسی چند نکته که در طراحی هندسی فین‌ها مهم‌اند پرداخته شده است [۱۰]:

الف: تعداد فین‌ها با تعداد پره‌های پروانه باید برابر باشند.

ب: اختلاف زاویه نصب بین مقطع پره در ریشه پروانه و فین‌ها از ۲۰- تا ۳۰+ درجه قابل تغییر است.

ج: قطر فین‌ها نباید از ۳۳٪ قطر پروانه بیشتر شود.

جدول ۱- داده‌های هندسی پروانه

پارامتر	مقدار
تعداد پره	۴
قطر	۱ متر
گام در نسبت شعاعی ۰/۷	۱/۰۸۴ متر
نسبت سطح گسترش یافته	۰/۵
زاویه اسکپو (درجه)	۱۰
زاویه ریک (درجه)	۶
جهت چرخش	راست گرد
مقطع پره	MAU

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{|V|^2}{2} + gz = \frac{p_{ref}}{\rho} + \frac{|V_0|^2}{2} \quad (7)$$

در معادله (۷) فشار  $p$ ، چگالی سیال  $\rho$  و فشار مرجع سیال  $p_{ref}$  فشار مرجع سیال می‌باشد. برای پروانه فشار مرجع فشار ناحیه بسیار دور از بالادست<sup>۲۳</sup> پروانه در راستای شفت پروانه است و با استفاده از قانون هیدرواستاتیک  $p_{ref} = p_{atm} + \rho g z_{atm}$  به دست می‌آید (فشار اتمسفر در ارتفاع  $z$  است). در ادامه پارامتر مهم و بی بعد یعنی ضریب فشار<sup>۲۴</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{0.5 \rho V_{ref}^2} \quad (8)$$

در معادله (۸) سرعت مرجع بوده و معمولاً برابر با  $|V_0|$  سرعت جریان ورودی است. برای پروانه سرعت مرجع معمولاً میزان سرعت ورودی یا مقدار  $nD$  در نظر گرفته می‌شود.  $D$  معرف قطر پروانه و  $n$  اندازه دور پروانه یا سرعت دورانی در هر دور بر ثانیه بوده و برابر است با:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (9)$$

معادله (۷) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{2}{V_{ref}^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{|V|^2 - |V_0|^2}{V_{ref}^2} + \frac{2gz}{V_{ref}^2} = -C_p \quad (10)$$

### ۳-۲- شرایط مرزی

برای حل معادله لاپلاس، مطابق با معادله (۵)، در جریان خارجی حول پروانه بایستی شرایط مرزی در هر یک از اجزای سطحی تعریف شوند. با توجه به شرایط مرزی، اجزای سطحی<sup>۲۵</sup> به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند:

- سطح جسم ( $S_B$ )
- سطح دنباله ( $S_W$ )
- سطح در بی نهایت ( $S_\infty$ )

### ۳-۲-۱- سطح جسم

بر روی سطح جسم برای ارضا شدن شرط مرزی، صفر

جدول ۲- داده‌های هندسی فین‌ها

پارامتر	مقدار
تعداد فین	۴
قطر	۰/۳۳ متر
زاویه نصب	متغیر
کورد	متغیر
جهت چرخش	راست گرد

گرفتن این حالت، همه سه فرض بالا برقرار شده و می‌توان از معادله لاپلاس استفاده کرد.

با در نظر گرفتن فرض غیرچرخشی بودن سیال می‌توان گفت سرعت اغتشاشی برابر با گرادیان پتانسیل اغتشاشی است. برای جریان سیال تراکم ناپذیر، معادله پیوستگی  $\nabla \cdot V(x, t) = 0$  به صورت معادله لاپلاس در می‌آید:

$$\nabla^2 \phi(x, t) = 0 \quad (5)$$

سرعت کل در هر نقطه از میدان سیال برابر با جمع سرعت اغتشاشی و سرعت غیر اغتشاشی است.

$$V(x, t) = V_0(x, t) + \nabla \phi(x, t) \quad (6)$$

برای جریان سیال تراکم ناپذیر، غیر ویسکوز و غیر چرخشی معادلات ممتوم نویر-استوکس به صورت معادله برنولی خلاصه می‌شود. در دستگاه مختصات متصل به جسم معادله برنولی به صورت زیر در می‌آید:

جسم بایستی به سمت صفر میل کند.

$$X \rightarrow \infty \Rightarrow \nabla \phi \rightarrow 0 \quad (13)$$

### ۳-۳- شرط کوتا<sup>۲۷</sup>

جریان عبوری از یک بدنه غیر برآ<sup>۲۸</sup> را می توان توسط توزیع سینگولاریته های چشمه توصیف کرد. اما برای توصیف جریان عبوری از اجسام برآ، که توسط توزیع سیرکولاسیون روی سطح مدل می شوند، یک شرط مرزی در لبه فرار جسم باید ارضا شود که بیان می کند در لبه فرار مقدار محدود و یکتایی برای سرعت باید وجود داشته باشد.

$$|\nabla \phi|_{TE} < \infty \quad (14)$$

### ۴-۳- روش حل مبتنی بر اجزای مرزی

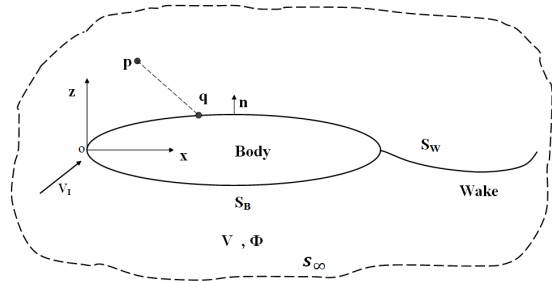
در مسائل مقدار مرزی پتانسیل سرعت برای هر نقطه  $p$  مطابق شکل (۵) را می توان به یک معادله انتگرالی تبدیل کرد: [۱۶]

$$2\pi\phi(p) = \iint_{S_B} \left[ \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} - \frac{\partial \phi(q)}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} \right] dS + \iint_{S_W} \Delta \phi(q) \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} dS \quad (15)$$

از آنجا که  $\frac{\partial \phi}{\partial n}$  روی سطح جسم معلوم است، معادله (۱۵)، معادله انتگرالی فردهولم از نوع دوم برای متغیر  $\phi$  است. اختلاف پتانسیل در عرض سطح دنباله برابر با اختلاف مقادیر پتانسیل روی سطح بالا و پایین پره در لبه فرار آن است. گسسته سازی معادله (۱۵)، منجر به یک دستگاه معادلات خطی با مجهول  $\phi$  می شود. شکل ماتریسی معادله (۱۵) به صورت معادله (۱۶) است:

$$[D][\phi] = [S][\phi_n] + [W][\Delta\phi] \quad (16)$$

که  $\phi_n = \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\bar{V}_1 \cdot n$  (در معادله (۱۱) بیان شده است) با توجه به شرط مرزی سینماتیک به دست می آید.  $\phi$  پتانسیل اغتشاشی مجهول و  $\Delta \phi$  پرش پتانسیلی مجهول در لبه فرار پره است.



شکل ۵- جسم در مقابل جریان [۱۸]

بودن مولفه سرعت عمود بر جزء، می توان از شرط مرزی نیومن<sup>۲۶</sup> استفاده کرد. مقدار پتانسیل کل، جمع پتانسیل اغتشاشی و پتانسیل ناشی از جریان ورودی، برابر صفر بوده و لذا شرط نیومن به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -V_1 \cdot n \quad (11)$$

$n$  بردار نرمال هر جزء به سمت بیرون است.

### ۲-۲-۳-۲- سطح دنباله

سطح دنباله یک لایه گردابه با ضخامت صفر، چسبیده به جسم و دربرگیرنده تمامی گردابه های جاری شده توسط جسم است. سطح فوقانی و سطح تحتانی دنباله به ترتیب با علامت های  $+$  و  $-$  مشخص شده اند. سطح دنباله باید شرایط مرزی را ارضا کند. برای ارضای شرط مرزی سینماتیکی دنباله گردابه  $S_W$  باید به صورت یک سطح از بخار سیال باشد. اگر  $V_n$  نشان دهنده سرعت سطح دنباله در جهت عمود باشد، شرط مرزی سینماتیکی برای جریان پایا و ناپایا به صورت زیر بیان می شود:

$$V^+ \cdot n = V^- \cdot n = V_m \cdot n = V_n \quad (12)$$

$V_m = \frac{1}{2}(V^+ + V^-)$  سرعت متوسط سیال است.

### ۳-۲-۳-۲-۳- سطح در بی نهایت

در سطح مرز در بی نهایت،  $S_\infty$ ، آشفتگی ناشی از سطح



ماتریس‌های [D]، [S] و [W] شامل ضرایب اثر هستند. درایه‌های این ماتریس‌ها به صورت معادله (۱۷) محاسبه می‌شوند:

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^K \left[ \iint_{S_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ijk}} \right) dS_j \right]$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^K \left[ \iint_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ijk}} \right) dS_j \right] \quad (17)$$

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left[ \iint_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_j} \left( -\frac{1}{2\pi r_{ijk}} \right) dS_j \right]$$

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

سرعت مماسی و در نتیجه فشار روی سطح جسم را می‌توان با مشتق‌گیری عددی از توزیع پتانسیل به دست آمده، محاسبه کرد. در معادله (۱۵)، بردار نرمال عمود بر سطح جزء است و  $R$  فاصله بین نقطه  $p$  در فضای  $xyz$  و نقطه  $q$  در فضای  $\xi\eta\zeta$  است.

$$R = |Q-P| = \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-x)^2 + (\zeta-x)^2} \quad (18)$$

سرعت‌های القایی در یک نقطه میدانی  $p$  در خارج سطح جسم، می‌تواند با استفاده از گرادیان پتانسیل سرعت  $\phi$ ، به دست آید.

$$v(p) = \nabla_p \phi(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \phi(q) \nabla_p \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} dS$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_W} \Delta \phi(q) \nabla_p \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} dS \quad (19)$$

$$- \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} (V_I \cdot n_q) \nabla_p \frac{\partial}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} dS$$

### ۳-۵- محاسبات پارامترهای عملکرد هیدرودینامیکی پروانه

به کمک روش اختلاف محدود، می‌توان مشتقات پتانسیل در دو راستای شعاعی و طول کورد را تعیین کرده و توزیع سرعت روی سطح پروانه را محاسبه کرد. نمودار عملکرد یک پروانه شامل ضرایب تراست، گشتاور پروانه و بازده است که بر

مبنای توزیع سرعت مماسی روی سطح جسم محاسبه می‌شوند.

$$C_p(p) = 1 - \frac{|V_I|^2}{|V_T|^2}$$

$$P(p_i) = \frac{1}{2} \rho \left[ |V_I|^2 - |V_T|^2 \right] \quad (20)$$

$$T_{Potential} = K \sum_{i=1}^{N_B} P(p_i) n_{xi} \cdot \Delta S_i$$

$$Q_{Potential} = K \sum_{i=1}^{N_B} P(p_i) (n_{yi} \cdot z_i - n_{zi} \cdot y_i) \Delta S_i$$

مساحت جزء  $(\Delta S)$ ، مولفه‌های بردار نرمال  $(n_x, n_y, n_z)$ ، مختصات مرکز جزء  $(x, y, z)$ ، و تعداد پره‌ها  $(K)$ ، پارامترهای هندسی موثر در تعیین تراست و گشتاور پروانه هستند. برای محاسبه اثر ویسکوز، به کمک روش‌های تجربی مطابق معادلات زیر عمل شده است:

$$V_j = \sqrt{V_A^2 + (2\pi n r_j)^2} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$Rn_j = \frac{(\text{chord} \times V)_j}{v}$$

$$\text{Force}_j = 0.5 \rho (C_f \times \text{chord} \times V^2)_j \quad (21)$$

$$T_{Viscous} = K \sum_{i=1}^m \text{Force}_j \cdot \sin \beta_j$$

$$Q_{Viscous} = K \sum_{i=1}^m r_j \cdot \text{Force}_j \cdot \cos \beta_j$$

پس از تعیین تراست و گشتاور ناشی از جمله‌های ویسکوز، می‌توان ضرایب هیدرودینامیکی پروانه را محاسبه کرد.

$$T_{total} = |T_{Pot}| - |T_{Vis}|$$

$$Q_{total} = |Q_{Pot}| + |Q_{Vis}|$$

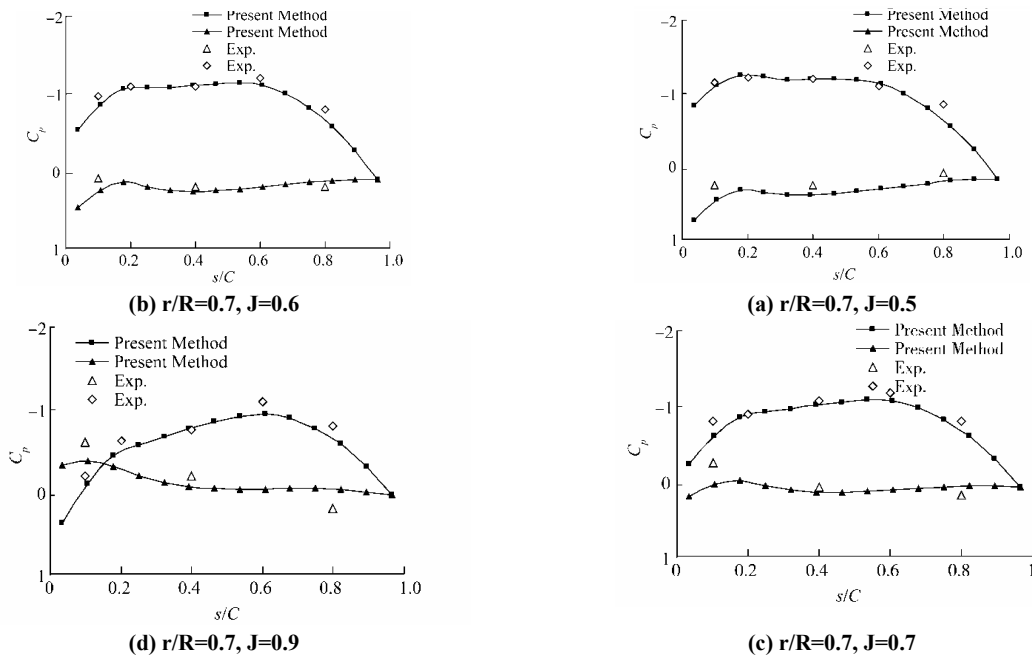
$$j = \frac{V_A}{nD}, \quad \eta = \frac{K_T}{K_Q} \frac{j}{2\pi} \quad (22)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

در معادلات فوق  $\rho$  چگالی آب،  $v$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $n$  سرعت دورانی پروانه و  $D$  قطر پروانه است.

### ۴- روش‌های محاسبه اثر اجسام در مجاورت هم

ماتریس کوپل و روش تکراری<sup>۲۹</sup>، دو روش متداول برای بررسی اثر اجسام در مجاورت هم است. در روش ماتریس



شکل ۶- مقایسه توزیع فشار در سرعت‌های مختلف با نتایج تجربی

برای بررسی اثرات القایی سه جسم در مجاورت هم ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل ماتریسی زیر دیده می‌شود، افزایش تعداد اجسام باعث بزرگ شدن قابل ملاحظه ماتریس می‌شود. شکل ماتریسی یک سیستم سه عضوی (مثلاً) پره‌ها-تویی-فین‌های انتهایی تویی) به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \text{اثر القایی جسم 1 روی 3} & \text{اثر القایی جسم 1 روی 2} & \text{ضرایب تأثیر جسم 1 روی خود} \\ \text{اثر القایی جسم 2 روی 3} & \text{ضرایب تأثیر جسم 2 روی خود} & \text{اثر القایی جسم 2 روی 1} \\ \text{ضرایب تأثیر جسم 3 روی خود} & \text{اثر القایی جسم 3 روی 2} & \text{اثر القایی جسم 3 روی 1} \end{bmatrix}$$

## ۵- بحث و بررسی نتایج محاسبات

### ۵-۱- مقایسه محاسبات توزیع فشار و ضرایب

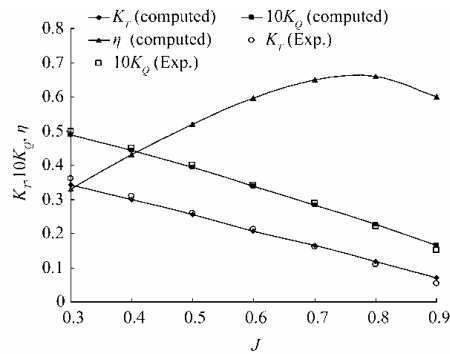
#### هیدرودینامیکی پروانه با نتایج تجربی

به منظور اعتبار سنجی نتایج لازم است ابتدا نتایج محاسبات برای یک نمونه پروانه استاندارد با نتایج تجربی موجود مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور یک نمونه پروانه استاندارد با زاویه اسکینو بالا<sup>۳</sup> از سری Seiu-MAU مورد استفاده قرار

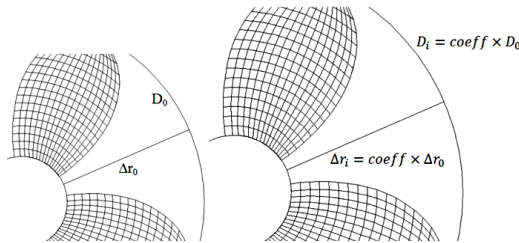
کوپل، کلیه اجسام در مجاورت هم به عنوان یک جسم در نظر گرفته شده و حجم ماتریس ضرایب افزایش می‌یابد و موجب بالا رفتن قابل ملاحظه‌ی زمان و خطای محاسبات می‌شود.

شرط مرزی کوتاه برای اصلاح توزیع سرعت در لبه فرار پره به کار می‌رود و در این روند اصلاح، همواره نیاز به حل ماتریس مجهولات است. یکی دیگر از مشکلات استفاده از ماتریس کوپل، عدم ارضا شدن شرط کوتاست. به نظر می‌رسد یکی از دلایل این مشکل این است که شرط کوتاه باید به صورت مجزا برای هر جسم ارضا شود ولی ماتریس مجهولات شامل مقادیر پتانسیل روی اجسام مجاور نیز است که باعث ایجاد اختلال در روند به کار رفته برای اصلاح سرعت‌ها روی یکی از اجسام می‌شود. این مشکل وقتی بیشتر نمایان می‌شود که ماهیت دو جسم متفاوت باشد، به این معنی که یک جسم از نوع سطوح برا باشد ولی جسم دیگر چنین ویژگی نداشته باشد؛ زیرا سطوح غیر برا نیازی به استفاده از شرط کوتاه ندارند.

شکل ماتریسی زیر، نمونه‌ای از تشکیل یک ماتریس کوپل



شکل ۷- مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه در شرایط اوپن واتر

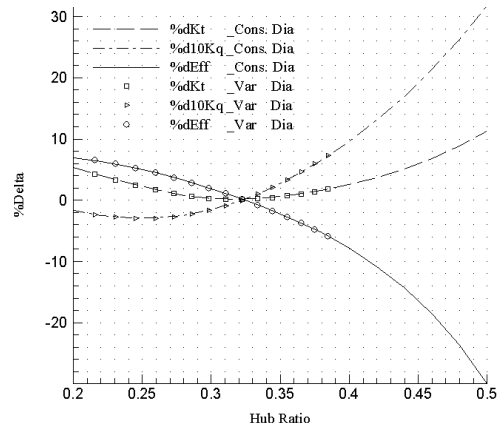


شکل ۹- نحوه تغییرات هندسه پروانه در حالت قطر متغیر

دو حالت قطر ثابت و قطر متغیر پروانه مورد مطالعه قرار گرفته است. درصد تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی در نسبت‌های توپی مختلف از معادله زیر استخراج می‌شود:

$$\% \Delta = \frac{\text{Hydro Coeff. (without Hub - with Hub)}}{\text{Hydro Coeff. without Hub}} \times 100 \quad (23)$$

در شکل (۸) درصد تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی در نسبت‌های توپی مختلف نشان داده شده است. در حالت اول، قطر پروانه ثابت و قطر توپی در حال افزایش است و در حالت دوم، قطر پروانه و قطر توپی به یک نسبت افزایش یافته است؛ طبق نتایج به دست آمده، اثر توپی در یک نسبت مشخص به حداقل مقدار خود می‌رسد و از طرفی درصد تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی در حالت‌های قطر ثابت و متغیر، یکسان

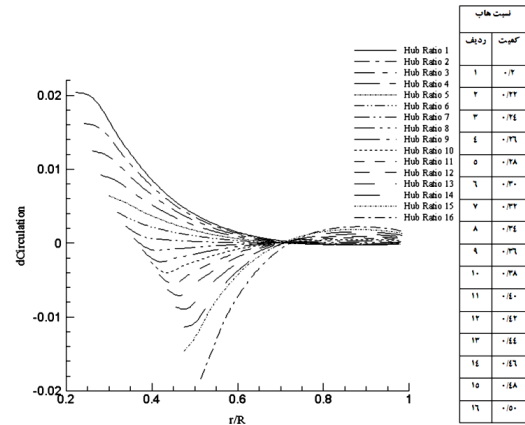
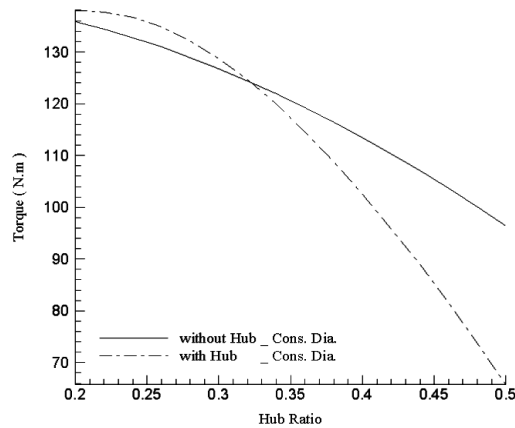


شکل ۸- درصد تغییرات ضرایب پروانه با تغییر نسبت توپی

گرفته است که نتایج تجربی این پروانه موجود است [۱۶]. این پروانه یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین نمونه‌های استاندارد از پروانه دریایی است که توسط اکثر محققان دریایی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین پارامتر در تحلیل هیدرودینامیکی پروانه، توزیع فشار و تعیین ضرایب هیدرودینامیکی است. در شکل (۶) محاسبات توزیع فشار در سرعت‌های مختلف با نتایج تجربی مقایسه شده است. مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی پروانه در شرایط آب آزاد<sup>۳۱</sup> با نتایج تجربی در شکل (۷) نشان می‌دهد که نتایج محاسبات با روش حاضر از دقت بالایی برخوردار است.

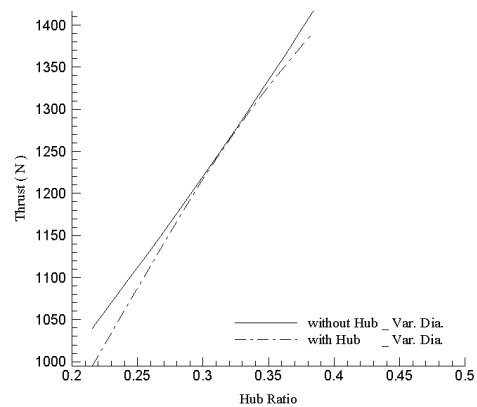
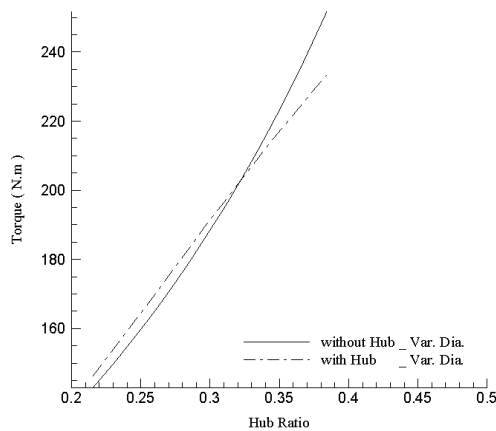
## ۲-۵- بررسی اثر افزایش قطر توپی

در این بخش، اثر افزایش قطر توپی نسبت به قطر پروانه در



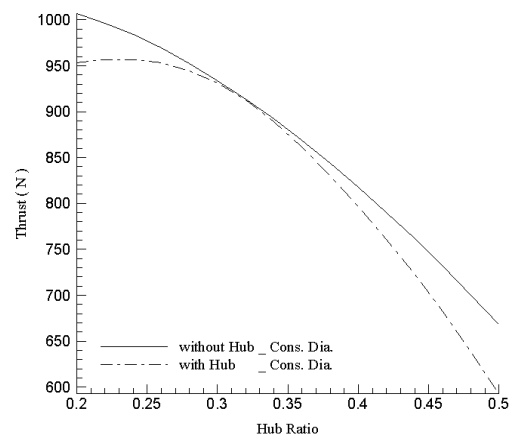
شکل ۱۲-الف- منحنی تغییرات گشتاور در نسبت‌های توپی مختلف در حالت قطر ثابت

شکل ۱۰- تاثیر توپی بر توزیع سیرکولاسیون در نسبت‌های توپی مختلف



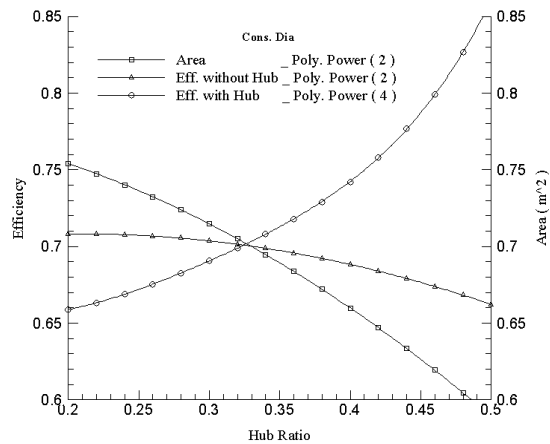
شکل ۱۱-الف- منحنی تغییرات تراست در نسبت‌های توپی مختلف در حالت قطر متغیر

شکل ۱۲-ب- منحنی تغییرات گشتاور در نسبت‌های توپی مختلف در حالت قطر متغیر

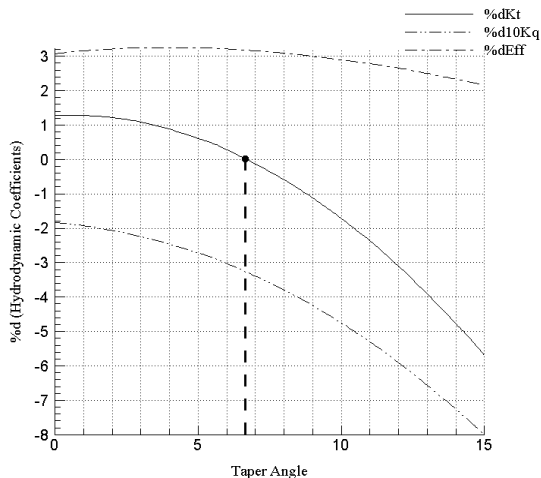


شکل ۱۱-ب- منحنی تغییرات تراست در نسبت‌های توپی مختلف در حالت قطر ثابت

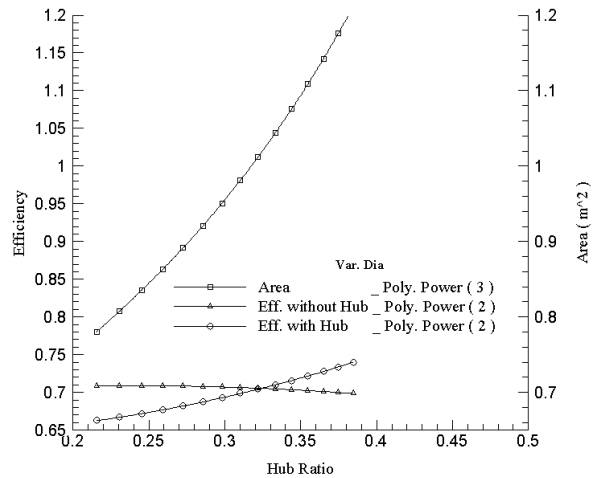
تنها علت ثابت ماندن درصد تغییرات در این دو شرایط متفاوت، ثابت ماندن نسبت سطح گسترش یافته، تعداد پره‌ها، توزیع گام پروانه و نسبت توپی است. لازم به ذکر است که در دو حالت مورد مطالعه بررسی تاثیر تغییرات خیلی زیاد قطر توپی پروانه، به عنوان نمونه تفاوت قطر توپی دو پروانه در مقیاس مدل و نمونه اصلی، مورد نظر نیست. بنابراین پروانه و توپی اصلی برای تشکیل هندسه مدل هر دو به یک نسبت ثابت اشل شده‌اند که در شکل (۹) با یک ضریب مقیاس نشان



شکل ۱۳- تعیین تاثیر توپی بر تغییر راندمان در شرایط قطر ثابت



شکل ۱۵- منحنی تغییر ضرایب عملکردی با افزایش زاویه توپی و در نسبت توپی ۰/۲

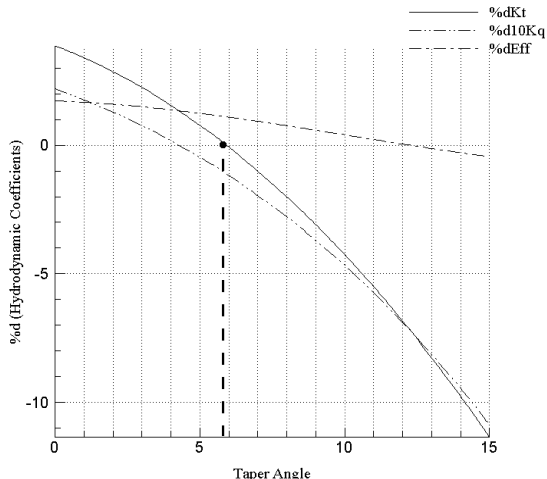


شکل ۱۴- تعیین تاثیر توپی بر تغییر راندمان در شرایط قطر متغیر

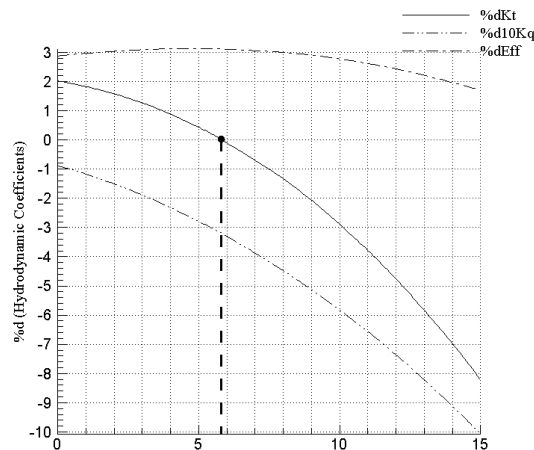
نسبت‌های توپی مختلف را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۱۱-الف و ب) و (۱۲-الف و ب) نتایج محاسبات تراست و گشتاور پروانه در دو حالت قطر ثابت و متغیر نشان داده شده است. در حالت قطر ثابت، به دلیل کاهش فضای بین ریشه و نوک پروانه، تراست و گشتاور روند نزولی دارد ولی در حالت قطر متغیر، این فضا با یک ضریب ثابت در حال افزایش است و منطقی است که منحنی خروجی‌های پروانه، کاملاً صعودی باشد. در حالت قطر ثابت، اثر توپی تاثیر قابل توجهی بر روی

داده شده است.

با مقایسه تغییر توزیع سیرکولاسیون در راستای شعاعی با اعمال نسبت توپی‌های مختلف مشاهده می‌شود که در نسبت توپی پایین، میزان تاثیر توپی پروانه در مقاطع شعاعی نزدیک به ریشه پره مشهود است. ولی با افزایش نسبت توپی، مقاطع شعاعی بالاتر نیز تحت تاثیر قرار گرفته و سیرکولاسیون در آن نواحی کاهش می‌یابد که روند عکسی نسبت به تغییرات در ریشه پره دارد. شکل (۱۰) تاثیر توپی بر سیرکولاسیون در



شکل ۱۷- منحنی تغییرات ضرایب عملکردی با افزایش زاویه توپی و در نسبت توپی ۰/۴



شکل ۱۶- منحنی تغییرات ضرایب عملکردی با افزایش زاویه توپی و در نسبت توپی ۰/۳

جدول ۳- زاویه مخروطی بی اثر در نسبت‌های توپی مختلف

نسبت توپی	زاویه مخروطی بی اثر در تراست
۰/۲	۶/۶۵۹۳
۰/۳	۵/۷۹۵۴
۰/۴	۵/۹۱۶۶

دارای کمینه است که در جدول (۳) زاویه مخروط بی اثر در نسبت‌های توپی مختلف ارائه شد. با مخروطی شدن توپی، قطر آن در راستای طول کورد متغیر بوده و نسبت توپی معرفی شده برای این سه حالت حداقل مقداری خواهد بود که در لبه جلویی پره اتفاق می‌افتد. اگر در نسبت توپی ۰/۳، مقدار متوسط نسبت توپی را محاسبه کنیم، تقریباً به مقدار قطر توپی بی اثر که در بخش (۵-۲) مورد بررسی قرار گرفت خواهیم رسید.

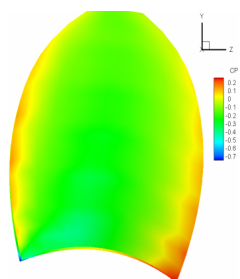
موضوع دیگری که می‌توان در این منحنی‌ها به آن اشاره کرد، ثابت ماندن تغییرات راندمان تا زاویه مخروطی بی اثر در هر نسبت توپی است. و از طرفی منحنی تغییرات گشتاور نیز با عبور از نسبت توپی بی اثر که در بخش قبل محاسبه شد خط صفر را قطع می‌کند.

با افزایش زاویه مقادیر منفی ضریب فشار در مقاطع بالایی

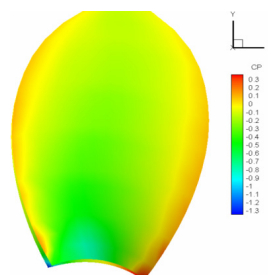
راندمان پروانه می‌گذارد به گونه‌ای که چندجمله‌ای<sup>۳۲</sup> متناسب با تغییرات راندمان، دو درجه افزایش پیدا کرده است، شکل (۱۳). در حالت قطر متغیر، اگرچه وجود توپی باعث تغییر عملکرد پروانه شده ولی درجه چندجمله‌ای ثابت باقی مانده است، شکل (۱۴).

### ۳-۵- بررسی اثر تغییرات زاویه مخروطی توپی

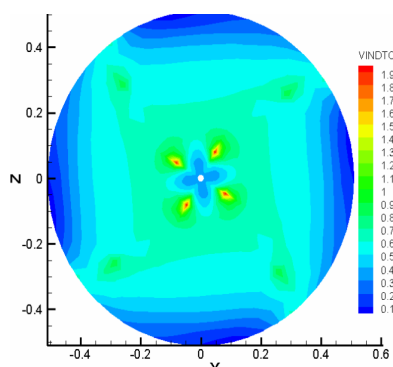
در این بخش در سه نسبت توپی مختلف، زاویه مخروطی توپی از صفر تا پانزده درجه تغییر کرده و در هر نسبت توپی زاویه‌ای که در آن اثر توپی به حداقل رسیده محاسبه شده است. شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) به ترتیب تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی با افزایش زاویه توپی در نسبت‌های ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ را نشان می‌دهند. با مقایسه این سه زاویه می‌توان مشاهده کرد که تقریباً در نسبت توپی ۰/۳، تغییرات زاویه مخروطی



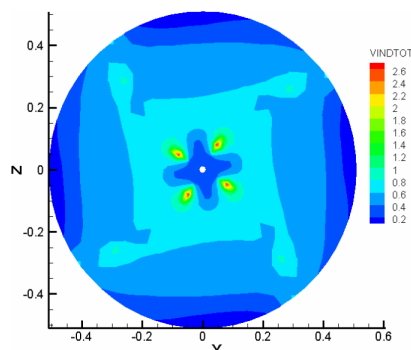
شکل ۱۸-ب- توزیع فشار در سطح مکش پره در نسبت توپی ۰/۴ و در زاویه توپی ۶ درجه



شکل ۱۸-الف- توزیع فشار در سطح مکش پره در نسبت توپی ۰/۲ و در زاویه توپی ۶ درجه



شکل ۲۰- تاثیر فین‌ها بر توزیع اثرات القایی پروانه، در فاصله محوری  $R_{PBCF}/2$  نسبت به نقطه انتهایی پروانه ( با فین )



شکل ۱۹- تاثیر فین‌ها بر توزیع اثرات القایی پروانه، در فاصله محوری  $R_{PBCF}/2$  نسبت به نقطه انتهایی پروانه ( بدون فین )

کاهش گردابه ناشی از توپی می‌شود. در اینجا، ابتدا اثر فین در انتهای توپی و همچنین موقعیت و زاویه فین بر سرعت القایی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

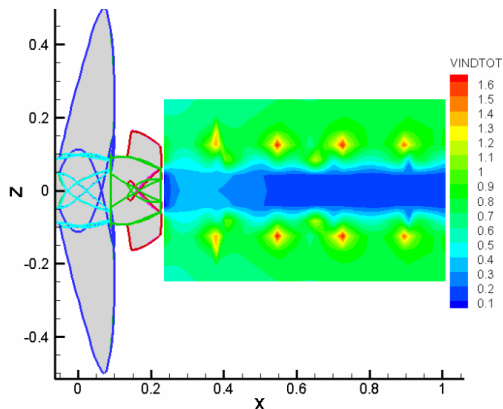
#### ۵-۴-۱- تحلیل کلی فین‌های انتهایی توپی

این فین‌ها به عنوان ابزارهای تولید کننده تراست تلقی نمی‌شوند زیرا معمولاً گشتاور تولیدی آنها اثرات تراست تولیدی را از بین می‌برد. فین‌های نصب شده در انتهای توپی با هدف کاهش و یکنواخت‌سازی اثرات القایی پروانه در پایین‌دست جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) توزیع سرعت‌های القایی روی یک دیسک در پایین‌دست جریان (با فین و بدون آن) نمایش داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده کاهش قابل ملاحظه‌ای در ماکزیمم مقدار اندازه سرعت و توزیع یکنواخت‌تر در سرعت‌های القایی مشاهده می‌شود.

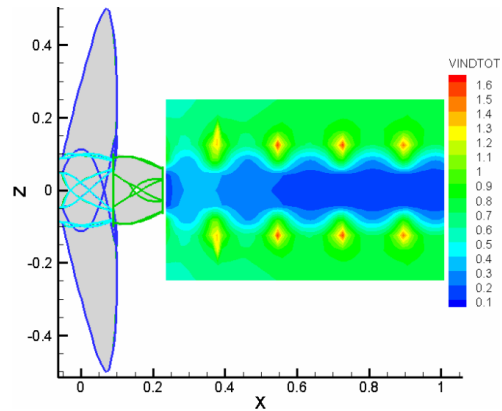
پره به سمت صفر میل می‌کند، ولی در مقاطع نزدیک به ریشه مقدار منفی ضریب فشار شدیداً افزایش می‌یابد که احتمال ایجاد کاویتاسیون را بالا می‌برد. با توجه به اینکه نسبت سطح گسترش<sup>۳۲</sup> یافته ثابت نگه‌داشته شده، با افزایش نسبت توپی طول کورد پرها افزایش یافته و طبق نتایج به‌دست آمده مقادیر منفی ضریب فشار کمتر تحت تاثیر زاویه توپی قرار می‌گیرند. شکل (۱۸-الف و ب) توزیع بی بعد فشار در سطح مکش پره در نسبت توپی ۰/۲ و ۰/۴ و در زاویه توپی ۶ درجه را نشان می‌دهند.

#### ۵-۴-۲- تحلیل عملکرد فین‌های انتهایی توپی

در این بخش، علاوه بر بررسی اثر هیدرودینامیکی فین، تحلیلی بر تغییر پارامترهای هندسی آن نیز انجام می‌گیرد. به‌طورکلی اثر فین برای کاهش سرعت القایی است که منجر به

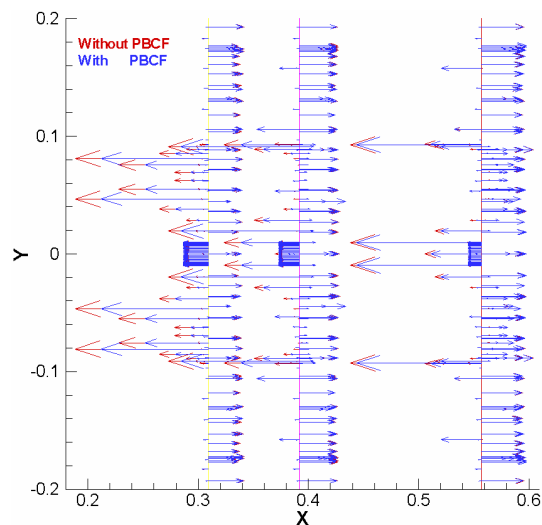


شکل ۲۲- تاثیر فین‌ها بر توزیع اثرات القایی پروانه در راستای محور آن ( با فین )



شکل ۲۱- تاثیر فین‌ها بر توزیع اثرات القایی پروانه در راستای محور آن ( بدون فین )

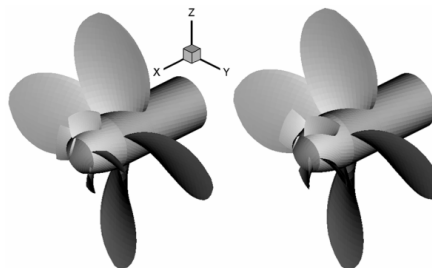
تغییر اثرات القایی پروانه در راستای محوری با و بدون فین در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. بدون وجود فین، اثرات القایی با یک دوره تناوب تا پایین دست جریان ادامه می‌یابد. وجود این تناوب را می‌توان ناشی از نحوه شکل‌گیری جریان روی بخش انتهایی توپی دانست و متناسب با فرکانس دوران پروانه تولید می‌شوند. با نصب فین روی انتهای توپی، این اثرات به حداقل مقدار خود می‌رسد. مهم‌ترین اثر فین‌ها در کاهش مولفه‌های منفی یا برگشتی اثرات القایی در راستای محوری است که با دور شدن از پروانه این اثرات کاهش می‌یابد. شکل (۲۳) اثر فین‌ها بر مولفه سرعت محوری القایی را نشان می‌دهد. مطابق شکل اثر فین باعث می‌شود که اندازه مولفه سرعت محوری کاهش یابد.



شکل ۲۳- اثر فین‌ها بر مولفه سرعت محوری اثرات القایی روی دیسک‌های دورشونده از پروانه

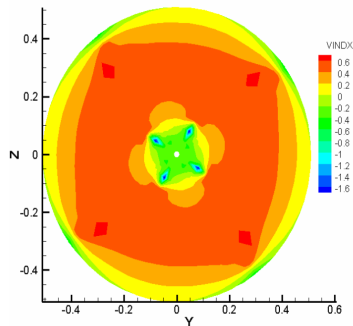
#### ۵-۴-۲- بررسی تغییرات اختلاف فاز بین پره و فین

طبق توصیه‌های مطرح شده در مورد مدل‌سازی هندسه فین در بخش (۲-۴)، پره فین باید به گونه‌ای قرار گیرد که لبه جلویی آن مابین فضای بین دو پره پروانه باشد تا بهترین عملکرد را داشته باشد. برای بررسی این موضوع، با تغییر اختلاف فاز بین فین و پره پروانه، هر یک از فین‌ها در امتداد یکی از پره‌های پروانه قرار گرفته و تاثیر آن بر مولفه محوری سرعت‌های القایی روی یک دیسک در پایین دست جریان در

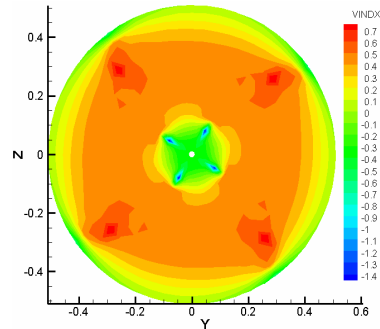


شکل ۲۴- تغییر اختلاف فاز بین فین و پره





شکل ۲۶- تغییر مولفه محوری سرعت‌های القایی با جابه‌جایی زاویه‌ای فین، در فاصله محوری  $R_{PBCF}/2$  نسبت به نقطه انتهایی پروانه (اختلاف فاز  $\frac{6\pi}{14}$ )



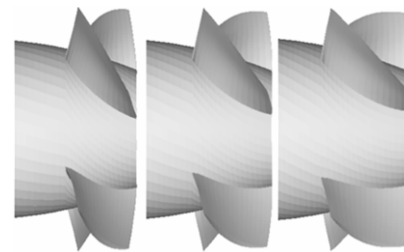
شکل ۲۵- تغییر مولفه محوری سرعت‌های القایی با جابه‌جایی زاویه‌ای فین، در فاصله محوری  $R_{PBCF}/2$  نسبت به نقطه انتهایی پروانه (اختلاف فاز  $\frac{7\pi}{14}$ )

نظر بوده است، دستیابی به اثرات زاویه بر سرعت محوری القایی است. هر چه این زاویه یا گام بیشتر باشد اثر سرعت القایی افزایش می‌یابد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر توپیی و استفاده از فین‌های انتهایی توپیی روی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است که نتایج زیر حاصل شد:

- نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت قطر توپیی، نیروی تراست کاهش و گشتاور افزایش می‌یابد که در نتیجه منجر به کاهش راندمان می‌شود.
- در پروانه‌ای با قطر ثابت، افزایش نسبت توپیی تأثیر زیادی بر عملکرد آن می‌گذارد که می‌توان با افزایش قطر پروانه، متناسب با تغییرات قطر توپیی، این تغییر عملکرد را به حداقل برسانیم.
- در هر نسبت توپیی، مخروطی شدن آن تا یک زاویه مشخص، تأثیری بر راندمان پروانه نخواهد داشت.
- مخروطی شدن توپیی احتمال ایجاد کاویتاسیون در نزدیک ریشه پره را بالا می‌برد که می‌توان با افزایش نسبت سطح گسترش یافته، از کاهش شدید ضریب فشار جلوگیری کرد.
- نصب فین در انتهایی توپیی، باعث کاهش اثرات القایی پروانه

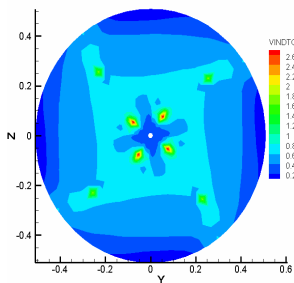


شکل ۲۷- تغییرات زاویه نصب فین

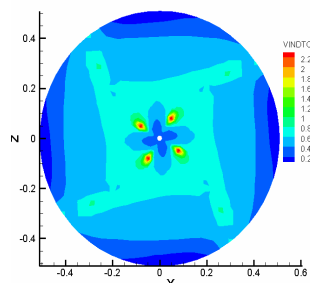
شکل (۲۴) نمایش داده شده است. با جابه‌جایی زاویه‌ای فین، مولفه منفی سرعت‌های القایی افزایش بیشتری پیدا می‌کند که یک عملکرد نامطلوب محسوب می‌شود. شکل‌های (۲۵) و (۲۶) تغییرات مولفه محوری سرعت‌های القایی با جابه‌جایی زاویه‌ای پره فین، در فاصله محوری  $R_{PBCF}/2$  نسبت به نقطه انتهایی پروانه در دو اختلاف فاز  $\frac{\pi}{14}$  و  $\frac{\theta\pi}{14}$  را نشان می‌دهند.

#### ۵-۴-۳- بررسی اثر زاویه نصب فین

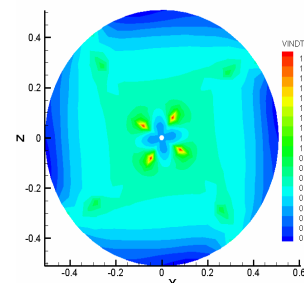
زاویه نصب فین یکی از پارامترهای هندسی مرتبط با زاویه گام فین است. شکل (۲۷) تغییرات زاویه نصب فین را در سه حالت متناظر با نسبت گام  $P/D=1.5, 2, 2.5$  نشان می‌دهد. شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) اندازه سرعت محوری القایی را در این سه گام مختلف نشان می‌دهند. آنچه که در این محاسبات مورد



شکل ۲۸- سرعت محوری القایی پروانه  
در نسبت گام  $P/D=1.0$



شکل ۲۹- سرعت محوری القایی پروانه در نسبت  
گام  $P/D=2.0$



شکل ۳۰- سرعت محوری القایی پروانه  
در نسبت گام  $P/D=2.5$

همسو با جریان هستند، تاثیر اندکی می گذارند.

- زاویه نصب فین و اختلاف فاز آن با پروانه، دو پارامتر مهم در مدل سازی هندسی فین هاست، به گونه ای که انتخاب نادرست این دو مولفه عملکرد فین را کاملاً از بین می برد.

در جریان پایین دست می شود و از طرفی جریان پایین دست یکنواختی بیشتری پیدا می کند.

- فین ها باعث کاهش مولفه منفی اثرات القایی پروانه در راستای محوری می شوند و طبق نتایج به دست آمده، بر مولفه هایی که

## واژه نامه

- |                                  |                            |                               |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1. wake                          | 12. cai                    | 23. upstream                  |
| 2. lifting surface               | 13. ouchi                  | 24. pressure coefficient      |
| 3. propeller boss cup fin (PBCF) | 14. junglewitz             | 25. surface element           |
| 4. propeller Hub                 | 15. iterative method       | 26. newman                    |
| 5. vortex                        | 16. trailing Edge          | 27. kutta condition           |
| 6. rudder                        | 17. transition             | 28. non lifting body          |
| 7. controllable pitch propeller  | 18. inviscid               | 29. iterative method          |
| 8. wind                          | 19. irrotational           | 30. high skew propeller (HSP) |
| 9. hess                          | 20. perturbation velocity  | 31. open water                |
| 10. glegg                        | 21. perturbation vorticity | 32. polynomial                |
| 11. liu                          | 22. effective wake         | 33. expanded area ratio       |

## مراجع

1. Yang, C., Wang, G., and Masahiro, T., "A Method of Improving the Precision of the Prediction of the Performance Characteristics of a CPP the Effect of Boss Being Taken Into Consideration," *Shipbuilding of China*, No. 116, 1992
2. Liu, Y-H, Ikehata, M. "Investigation into Hub Effect of Marine Propeller by Surface Vortex Lattice Method," *Journal of Society of Naval Arch. Japan*, Vol. 177, pp. 59-66, 1995.
3. Cai Hao-Peng, Su Yu-Min, Li Xin, and Shen Hai-Long, "Using the Surface Panel Method to Predict the Steady Performance of Ducted Propellers," *J. Marine. Sci. Appl.*, 2009.
4. Carlton, J.S., *Marine Propellers and Propulsion*, Second edition, 2007, Published by Elsevier Ltd.
5. Ouchi, K.B., Kono, Y., Shiotsu, T., Koizuka, H., "PBCF (Propeller Boss Cap Fins)," *J. Soc. Nav. Arch. Japan.*, Vol 163, 1988.
6. Ouchi, K., and Tamashima, M. "Research and Development of PBCF (Propeller Boss Cap Fin), New And Practical Device to Enhance Propeller Efficiency," *4th international Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS)*, Bulgaria, 1989.
7. Ouchi, K., Tamashima, M., and Arai, K. "Reduction of Propeller Cavitation Noise by PBCF (Propeller Boss Cap Fins)," *Kansai Soc. Naval Arch. Japan*, Vol. 216, 1991.
8. Ouchi, K., and Tamashima M., "A Study On Correlation Between Propeller Pitch Distribution And

- Improvement Of Propeller Efficiency by PBCF,” *Kansai Soc Naval Arch Japan*, Vol 217, 1992.
9. Junglewitz, A., “Der Nabeneinfluß Beim Schrauben propeller”, PhD Thesis, Univ. Rostock., 1996
  10. Abdel-Maksoud, M., Hellwig, K., and Blaurock, J., “Numerical and Experimental Investigation of the Hub Vortex Flow of a Marine Propeller,” *25<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John’s, Newfoundland-Labrador, Canada*, August 2004.
  11. Ghassemi, H., “Hydrodynamic Performance of the Marine Propeller in Steady and Unsteady Condition,” *Amirkabir Journal of Sci. Tech.*, No 54-B, 2003.
  12. Ukon, Y, Kudo, T., Yuasa, H., and Kamiirisa, H “Measurement of Pressure Distribution on Full Scale Propellers,” *Proceedings of the propellers/Shafting’91 Symposium, Virginia Beach, Virginia, USA*, 111-123, 1991.
  13. Ghassemi, H., Ghadimi, P. “Numerical Analysis of the High Skew Propeller of an Underwater Vehicle.” *J. of marine Science and Application*, Vol. 10, No.3, pp.289-299, 2011.