

# بررسی تجربی دقت تعمیم نتایج تست آب آزاد پروانه‌های CRP

## در نسبت پیشروی‌های مختلف

امین محمدزاده ثانی<sup>۱</sup>، مهدی پورواحدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>مربی سازمانی، گروه زیرسطحی، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام).

<sup>۲</sup>مربی سازمانی، گروه مکانیک، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام).

### چکیده:

تاکنون روش‌های محاسباتی مختلفی برای تحلیل پروانه‌های دریایی مخصوصاً پروانه‌های CRP که مورد استفاده در زیردریایی‌ها و برخی کشتی‌ها است به کار گرفته شده است؛ اما کارایی این روش‌ها به‌صورت قطع در هیچ منبع علمی گزارش نشده است. تست‌های آب آزاد و خودران‌ش رایج‌ترین تست‌ها در ارزیابی پروانه‌ها به شمار می‌روند. در این تحقیق سعی شده تا یکی از روش‌های رایج در تعمیم نتایج تست پروانه در آب آزاد (POW) به‌صورت علمی و با استناد به داده‌های تجربی، مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت آن در تعمیم نتایج از مدل به نمونه اصلی در نسبت پیشروی‌های مختلف مشخص گردد. داده‌های تجربی شامل نتایج تست مدل POW یک پروانه CRP در حالت برهم‌نهی اثر پروانه‌ها و ایضاً نتایج تست مدل برای تک‌تک پروانه‌های تکی تشکیل‌دهنده این سیستم CRP می‌باشد. شیوه بررسی دقت و کارایی روش مورد مطالعه در این مقاله بدین‌صورت است که با داده‌های خام تست مدل، ابتدا میزان افزایش ضرایب Kt و Kq پروانه CRP نسبت به پروانه‌های تکی مدل مشخص گردید. سپس به کمک کد تعمیم نتایج، با استخراج ضرایب Kt و Kq برای پروانه‌های نمونه واقعی، میزان افزایش ضرایب Kt و Kq پروانه CRP نسبت به پروانه‌های تکی مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه میزان این افزایش‌ها در حالت مدل و نمونه واقعی می‌توان به‌دقت تعمیم نتایج تست آب آزاد پروانه‌های CRP در نسبت پیشروی‌های مختلف پی برد.

واژه‌های کلیدی: تعمیم، آب آزاد، پروانه CRP، نسبت پیشروی، داده‌های تجربی

## Experimental investigation of result Scale out accuracy of CRP propeller open water test at different advance ratio

Amin Mohammadzade Sani<sup>1</sup>, Mahdi Poorvahedi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Organizational lecturer, Submarine Department, officers and guard training University of Imam Hussein

<sup>2</sup>Organizational lecturer, Mechanical Department, officers and guard training University of Imam Hussein

### Abstract:

Until now, various calculation methods have been used to analyze marine propellers, especially CRP propellers that are used in submarines and some ships; but the effectiveness of these methods has not been reported in any scientific source. Open water and self-propulsion tests are the most common tests in the evaluation of propellers. In this research, one of the common methods of results extrapolation of the propeller test in open water (POW) has been tried to evaluate scientifically based on experimental data, and its accuracy in results generalizing from the model to the base sample in different advance ratio has been determined. The experimental data includes the test results of the POW model of a CRP propeller in the superimposition mode of the effect of the propellers and also the model test results for each single propeller of this CRP system. The method of checking the accuracy and efficiency of the method studied in this article is that with the raw data of the model test, the increase in the Kt and Kq coefficients of the CRP propeller compared to the single propellers of the model was determined. Then, with the help of the result extrapolation code, by extracting the coefficients of Kt and Kq for base sample propellers, the increase of Kt and Kq coefficients of the CRP propeller compared to the single propeller was evaluated. By comparing the amount of these increases in the model and the base sample, it is possible to estimate the result Scale out accuracy of the CRP propeller open water test at different advance ratios.

**Keywords:** Scale out, Open water, CRP Propeller, Advanced ratio, Experimental data

امروزه بیش از ۸۵ درصد ظرفیت تجارت جهانی توسط سامانه‌های دریایی جابجا می‌شود. علیرغم این مزیت، این روش حمل‌ونقل دارای محدودیت‌هایی در سرعت عملکردی، برد عملیاتی و ذخیره انرژی است که تمامی آنها می‌توانند با تکیه بر ارتباط بین سرعت، نیروی پسا و مصرف انرژی، به سیستم رانش زیرسطحی به‌عنوان یک گلوگاه فناوریانه مرتبط شوند. از نظر هیدرودینامیکی می‌توان سیستم‌های رانش را به دو دسته عمده تقسیم‌بندی نمود: دسته اول، سیستم‌های رانش مربوط به سامانه‌هایی هستند که سامانه تأثیر اندکی بر روی سیستم رانش دارد که شامل بسیاری از شناورها مانند فله‌برها، نفت‌کش‌ها، یدک‌کش‌ها و ... می‌شود. امروزه تکنولوژی مرتبط با این دسته توسعه قابل قبولی یافته و به بلوغ کافی رسیده و تجاری‌سازی شده است. دسته دوم سیستم‌های رانش مربوط به سامانه‌هایی هستند که سامانه تأثیر قابل توجهی بر روی سیستم رانش دارد که دربردارنده زیرسطحی‌ها و برخی از شناورهای خاص می‌باشند و بسیاری از مسائل باز تحقیقاتی در این حوزه قرار دارند. به‌منظور انتخاب نوع سیستم رانش از بین مواردی همچون پروانه گام ثابت، پروانه غلاف دار، CRP و ... باید به الزاماتی پاسخ داده شود که شامل کاربرد سامانه، سرعت پیشروی سامانه، ضرورت بالانس گشتاور، اهمیت انتشار نویز آکوستیکی، اثرات سطح آزاد و برد عملکردی می‌باشد. در این تحقیق، سامانه CRP مدنظر قرار دارد که هنوز روش تعمیم نتایج مدل آنها به نمونه اصلی جزء چالش‌های این حوزه به شمار می‌رود. پروانه‌های CRP از دو پروانه تشکیل شده‌اند که بر روی یک محور هم‌راستا نصب شده‌اند و در خلاف جهت یکدیگر دوران می‌نمایند. با وجود معایبی مانند پیچیدگی طراحی هیدرودینامیکی و هندسی و وزن بیشتر در مقایسه با پروانه‌های تکی دارای مزایای بسیاری هستند که بخش عمده آن را می‌توان به احیاء و جذب انرژی ناشی از انرژی چرخشی پروانه جلو مرتبط دانست که در پروانه تک تلف می‌شود، از طرف دیگر با توجه به تقسیم توان و تراست لازم بین سیستم دو پروانه در مقایسه با سیستم تک پروانه در نهایت از نظر قطر، وزن پروانه و ارتعاشات، مزایای CRP بر سیستم تک پروانه غیرقابل انکار می‌باشد. با توجه به جهت چرخش متفاوت و

شرایط نسبی دو پروانه نسبت به همدیگر در پروانه‌های CRP این قابلیت وجود دارد که با انتخاب پارامترهای مناسب، گشتاور دو پروانه توسط همدیگر بالانس شود و این نکته در حرکت اژدر و قابلیت حفظ مسیر<sup>۱</sup> آن نکته اساسی و مهم است. تاکنون تحقیقات نسبتاً قابل توجهی در این زمینه انجام شده است که می‌توان به اهم این موارد اشاره نمود. موهان و همکاران [1] به اثر استرات (پایه نگهدارنده پروانه در تست مدل) پروانه‌های CRP پرداخته و این اثرات را هم به‌صورت تجربی و هم به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار داده و تأثیر این عامل را بر روی راندمان آب آزاد بررسی نمودند. در مطالعه موهان اثراتی که در استاندارد ITTC-78 جهت تعمیم نتایج نادیده گرفته شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است؛ نتیجه حاکی از آن است که ارتفاع لایه مرزی در تعمیم نتایج نمی‌تواند بدرستی دیده شود و این بزرگترین دلیل ناکارآمدی استاندارد ITTC می‌باشد. جیان هو و همکاران [2] نیز طی یک مطالعه عددی در مقاله خود به اثر تعمیم نتایج روی فشار مابین پروانه جلویی و عقبی در سیستم رانش CRP پرداخته و شبیه‌سازی عددی را با داده‌های تجربی مورد صحت‌سنجی قرار داد. نتایج حاکی از آن است که فشار مابین پروانه جلویی و عقبی می‌تواند تحت تأثیر بارهای وارده بر پروانه رفتارهای متفاوتی از خود بروز دهد که ماهیتاً با یکدیگر دارای تفاوت اساسی هستند. ژانگ و همکاران [3] نیز به اثرات برهم‌کنش سیال در دو موضع خاص پرداختند. یکی از این مواضع بین دو پروانه بود که تأثیرگذار روی راندمان پروانه در آب آزاد<sup>۲</sup> می‌باشد و موقعیت بعدی مابین پروانه و بدنه بود که تأثیرگذار روی راندمان هیدرودینامیکی است. این راندمان از تست خودرانش<sup>۳</sup> قابل استخراج می‌باشد. بوضوح می‌توان دید که نتایج برای سه ناحیه از یکدیگر تفکیک شده‌اند. این سه ناحیه عبارتند از: بعد از خروج از پروانه CRP، ناحیه بین دو پروانه و در نهایت ناحیه بین پروانه و بدنه (قبل از ورود به پروانه). رفتار سیال و پروانه در این ۳ قسمت یکسان نیست و در هر قسمت نیاز به تحلیل مجزا می‌باشد. کنشیرو و همکاران [4] نیز در مقاله خود به مقایسه ۵ نوع پروانه مختلف و بررسی کاویتاسیون در مدل و نمونه اصلی این نوع پروانه‌ها پرداختند. این پروانه‌ها شامل CP، اسکيو بالا<sup>۴</sup>، داکت‌دار، CRP و سوپرکاویتاسیون می‌شدند. نتایج

<sup>3</sup> Self propulsion

<sup>4</sup> High Skew

<sup>1</sup> Course keeping

<sup>2</sup> Open water

تقسیم نمود. قسمت اول شامل متغیرهای پروانه‌های تکی و تعمیم نتایج آنها می‌باشد که این معادلات را می‌توان از استاندارد ITTC [8] استخراج نمود و بخش دوم مربوط به حالت برهم‌نهی دو پروانه اختصاص دارد که روش‌های مختلفی برای تخمین تراست و گشتاور در این حالت‌ها ارائه شده است. روابط ون مانن [9] یکی از این روش‌هاست. در ادامه به معرفی این روابط می‌پردازیم.

در ابتدا سراغ روابط ITTC می‌رویم. ضرایب تراست و گشتاور پروانه‌های تکی در حالت مدل از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$k_{tm} = \frac{T_m}{\rho n_m^2 D_m^4} \quad (1)$$

$$k_{qm} = \frac{Q_m}{\rho n_m^2 D_m^5} \quad (2)$$

اندیس  $m$  در روابط بالا مربوط به پروانه مدل می‌باشد. غیر از دور که برحسب rps می‌باشد سایر پارامترها برحسب یکاهای متریک می‌باشند. جهت تعمیم نتایج از روابط زیر استفاده می‌نماییم [15]:

$$k_{ts} = k_{tm} - \Delta k_t \quad (3)$$

$$k_{qs} = k_{qm} - \Delta k_q \quad (4)$$

$$\Delta k_t = -0/3 \Delta C_D \frac{P}{D} \cdot \frac{cZ}{D} \quad (5)$$

$$\Delta k_q = -0/25 \Delta C_D \frac{P}{D} \cdot \frac{cZ}{D} \quad (6)$$

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS} \quad (7)$$

$$C_{DM} = 2 \left[ 1 + 2 \frac{t}{c} \right] \left[ \frac{0/04}{Re_{nco}^{\frac{1}{6}}} - \frac{5}{Re_{nco}^{\frac{2}{3}}} \right] \quad (8)$$

$$C_{DS} = 2 \left[ 1 + 2 \frac{t}{c} \right] \left[ 1/89 - 1/62 \log \left( \frac{c}{k_p} \right) \right]^{-2.5} \quad (9)$$

$$Re_{nco} = \frac{\rho V_R (0/7D)}{\mu} \quad (10)$$

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0/7\pi n D)^2} = V_A \sqrt{1 + \left( \frac{0/75\pi}{J} \right)^2} \quad (11)$$

در حالت برهم‌نهی پروانه‌ها که ماهیت سیستم رانش CRP را تشکیل می‌دهد روابط ضرایب تراست و گشتاور عبارتند از:

$$K_{Tm} = \frac{T_{fm} + T_{am}}{\rho n_{fm}^2 D_{fm}^4} \quad (12)$$

نشان می‌دهند که برخی از پروانه‌ها می‌توانند در پیش‌بینی سطح نویز به کمک کاویتاسیون رفتار با وضوح بالاتری از خود نشان دهند و برخی دیگر از پروانه‌ها در این زمینه با رفتار ضعیف‌تری ظاهر می‌شوند. ژان ژی وانگ و همکاران [5] در یک مقاله با عنوان «بررسی عددی اثر مقیاس عملکرد هیدرودینامیکی سیستم‌های رانش ترکیبی CRP-pod»، علاوه بر مطالعه اثر مقیاس بر عملکرد هیدرودینامیکی سیستم‌های رانش، اثرات نسبت دور پروانه‌ها بر روی راندمان این نوع سیستم رانش را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاکی از دو موضوع مهم می‌باشد: اول اینکه تجهیزات نگهدارنده همچون استرات می‌تواند الگوی واقعی جریان حول پروانه‌های CRP را برهم زده و نتایج نادرستی را در اختیار پژوهشگر قرار دهد و دوم آنکه یک پروانه جلویی نقش تعیین‌کننده در رفتار هیدرودینامیکی پروانه‌های Pod ایفا می‌کند. سمیون و همکاران [6] نیز در مقاله‌ای به بررسی اثر تغییر فاصله بین دو پروانه بر روی متغیرهای هیدرودینامیکی در تست مدل و به کمک روابط ITTC به تعمیم نتایج پرداختند. این بررسی که به صورت تجربی بوده در حوضچه کشش کشتی‌سازی شرکت سامسونگ صورت گرفته است. در قسمت نتایج به بررسی اثرات پروانه CRP بر بدنه و اثر بدنه بر پروانه CRP به کمک تست های آب آزاد و خودرانش پرداخته شده است. یاسوهیکو [7] نیز در مقاله خود به بررسی تغییر فرم هندسی تیغه‌ها بر روی تراست و گشتاور پروانه مقیاس شده CRP پرداخته و اثر این تغییر هندسه را روی راندمان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از اصلاح نواحی فشار جهت نیل به راندمان بالاتر می‌باشد. در مطالعه حاضر دقت روش ون مانن<sup>5</sup> در تعمیم نتایج پروانه‌های CRP مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین صورت که افزایش تراست، گشتاور و راندمان پروانه در حالت دوتایی نسبت به تکی مقایسه و با افزایش متغیرهای نام برده شده در تست مدل مقایسه گردید. نتایج حاکی از دقت مورد قبول روش ون مانن می‌باشند. این شیوه بررسی دقت می‌تواند الگویی برای دقت‌سنجی سایر روش‌های تعمیم نتایج گردد.

## ۲- معادلات

معادلات پروانه‌های CRP را می‌توان به دو قسمت

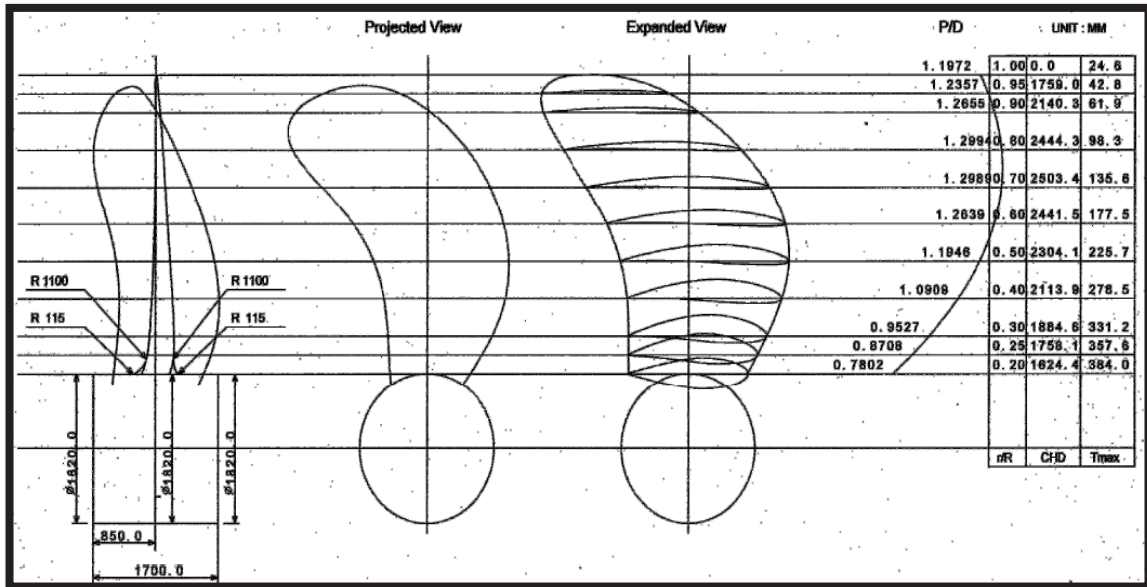
<sup>5</sup> Van manen

داده‌های مسئله متشکل هستند از: هندسه پروانه‌های جلویی و عقبی واقعی، مشخصات پروانه‌های مدل و سناریو توزیع بار و در نهایت ضرایب پروانه جلویی، عقبی و سیستم رانش CRP در تست مدل. در شکل‌های ۱ و ۲ نمای سطح تصویر شده و نمای گسترش یافته تیغه پروانه‌های جلویی و عقبی دیده می‌شود. این اطلاعات مشتمل هستند بر داده‌هایی همچون نسبت گام به قطر، طول کورد و ضخامت حداکثر در موقعیت‌های مختلف شعاعی.

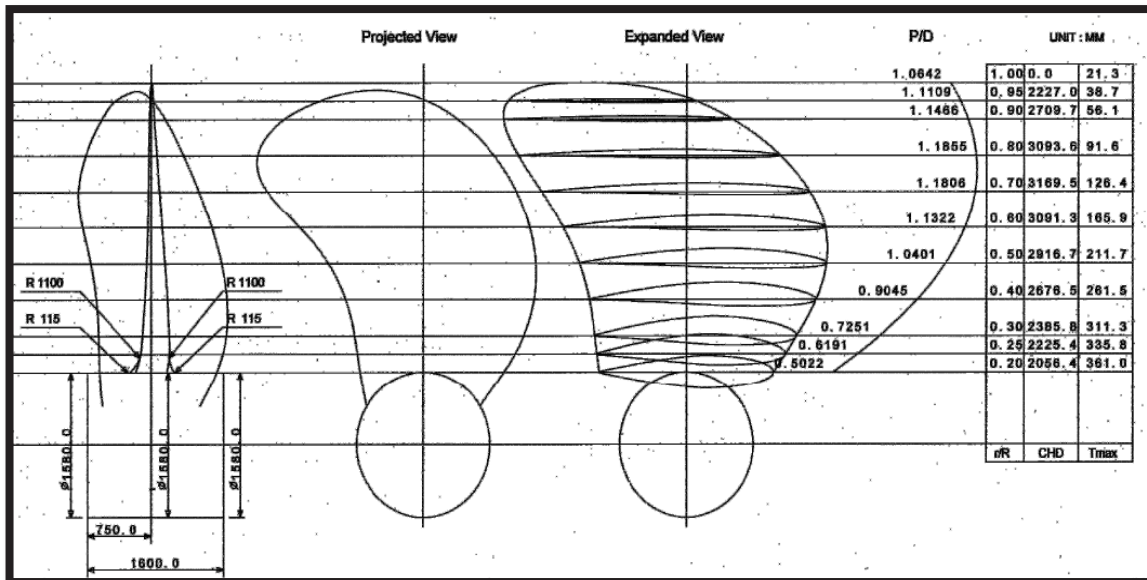
$$K_{Qm} = \frac{n_{fm} Q_{fm} + n_{am} Q_{am}}{\rho n_{fm}^3 D_{fm}^5} \quad (13)$$

در روابط بالا اندیس a مربوط به پروانه عقب و اندیس f مربوط به پروانه جلویی می‌باشد. اندیس‌های m و s نیز مشابه قبل به ترتیب بیانگر مدل و نمونه اصلی می‌باشند. در جدول ۴ تمامی نمادهای بکار رفته در روابط بالا معرفی گردیدند.

### ۳- داده‌های مسئله



شکل ۱- هندسه و مشخصات پروانه جلویی نمونه واقعی [15]



شکل ۲- هندسه و مشخصات پروانه عقبی نمونه واقعی [15]

این اطلاعات شامل نسبت مقیاس، نحوه توزیع بار، قطر، تعداد تیغه، سرعت پیشروی، گام، ضخامت و طول کورد

در جدول ۱ مشخصات پروانه‌های مدل و سناریو توزیع بار برای پروانه‌های جلویی و عقبی نمایش داده شده است.

می‌باشد. سیستم رانش CRP متشکل است از یک موتور، دو شافت و دو پروانه که هر پروانه روی یکی از این شافت‌ها سوار است و یک گیربکس که با بکارگیری دنده‌های مختلف

نسبت دورهای متفاوتی را می‌تواند بین دو پروانه توزیع نماید. المان‌های نام برده شده به مثابه پیکره اصلی سیستم رانش CRP می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات پروانه‌های مدل و سناریو توزیع بار

پروانه عقبی	پروانه جلویی	
1	1	نسبت مقیاس
142	142	
50%	50%	توزیع بار
18/78	21/63	قطر (cm)
4	5	تعداد تیغه
85/6	64/2	سرعت پیشروی در 0/7R (m/s)
22/1	28/1	گام در 0/7R (cm)
3	3/22	ضخامت در 0/7R (mm)
7/35	5/95	طول کورد در 0/7R (cm)

در این قسمت ضرایب  $K_t$  و  $K_q$  هر یک از پروانه‌های تکی و پروانه CRP مدل برحسب عدد  $J$  ارائه شده است. نتایج تست مدل از آزمایشگاه  $^6$ HMRI استخراج شده است [9]. این دیتاهای خام لازمه پردازش‌ها و تحلیل‌های

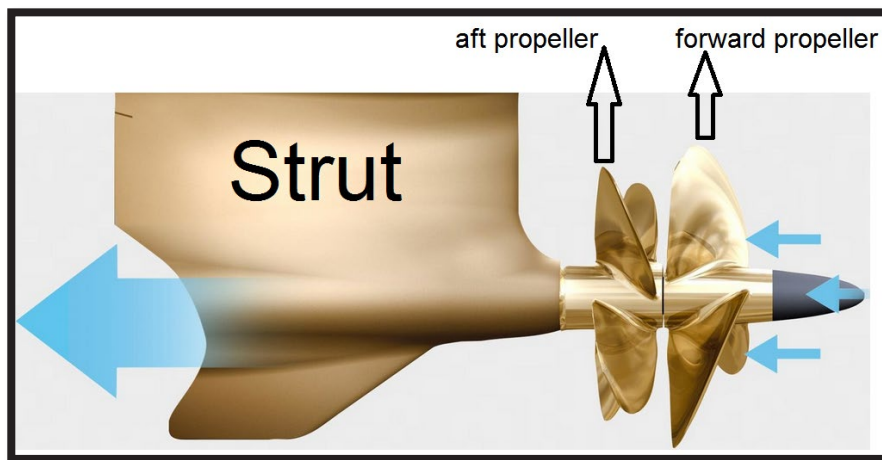
پژوهش حاضر می‌باشند. ضرایب در بازه نسبت پیشروی 0 تا 1/4 با گام 0/2 برای پروانه‌های جلویی و CRP و در بازه نسبت پیشروی 0 تا 1/2 با گام 0/2 برای پروانه عقبی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب پروانه جلویی، عقبی و سیستم رانش CRP در تست مدل

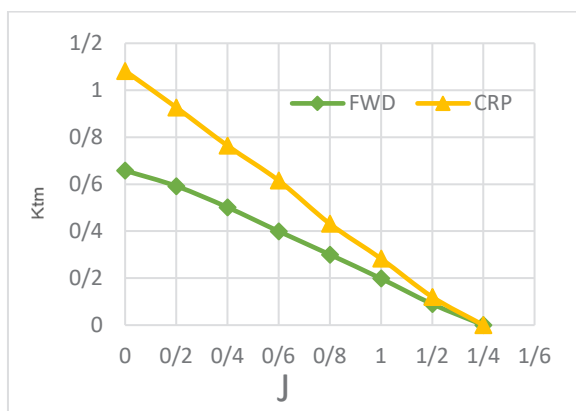
CRP		پروانه عقبی		پروانه جلویی		
10 kg	Kt	10 kg	Kt	10 kg	Kt	
2/1	1/1	0/86	0/58	1/18	0/68	J=0
1/8	0/94	0/77	0/5	1/07	0/6	J=0/2
1/5	0/78	0/6	0/4	0/92	0/5	J=0/4
1/2	0/72	0/47	0/28	0/77	0/4	J=0/6
0/95	0/47	0/28	0/18	0/6	0/3	J=0/8
0/68	0/3	0/12	0/05	0/44	0/2	J=1
0/4	0/13	0	0	0/25	0/1	J=1/2
0	0	--	--	0	0	J=1/4

لازم به ذکر است در حالتی که پروانه‌ها روی شناور نصب می‌شوند پروانه بزرگ‌تر نزدیک بدنه و پروانه کوچک‌تر دورتر از بدنه نصب می‌شود اما در تست آب آزاد (POW)

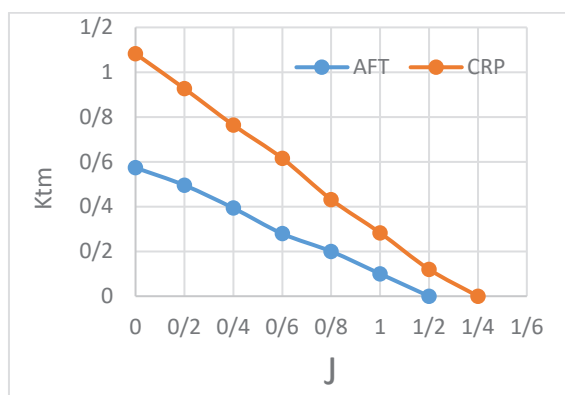
ترتیب قرارگیری عکس می‌شود یعنی پروانه‌ای که کوچک‌تر است نزدیک استرات و پروانه‌ای که بزرگ‌تر است دورتر از استرات قرار می‌گیرد [10].



شکل ۳- چیدمان پروانه‌های سیستم رانش CRP در تست POW



شکل ۴- مقایسه ضریب Ktm سیستم CRP با پروانه جلویی



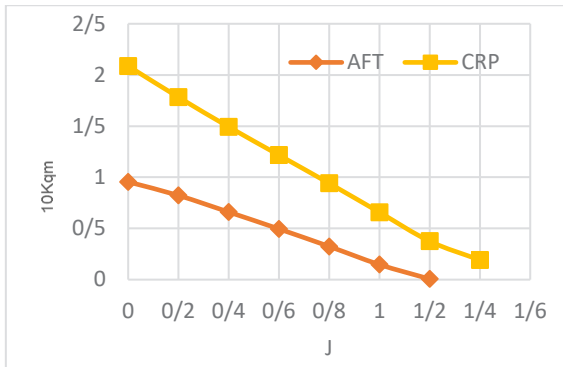
شکل ۵- مقایسه ضریب Ktm سیستم CRP با پروانه عقبی

شیوه بررسی دقت و کارایی روش مورد مطالعه در این مقاله (روش ون مانن) بدین صورت است که با داده‌های خام تست مدل، ابتدا میزان افزایش ضرایب  $K_t$  و  $K_q$  پروانه CRP نسبت به پروانه‌های تکی مدل مشخص گردید. سپس به کمک کد تعمیم نتایج، با استخراج ضرایب  $K_t$  و  $K_q$  برای پروانه‌های نمونه واقعی، میزان افزایش ضرایب  $K_t$  و  $K_q$  پروانه CRP نسبت به پروانه‌های تکی مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه میزان این افزایش‌ها در حالت مدل و نمونه واقعی می‌توان به دقت تعمیم نتایج تست آب آزاد پروانه‌های CRP در نسبت پیشروی‌های مختلف پی برد.

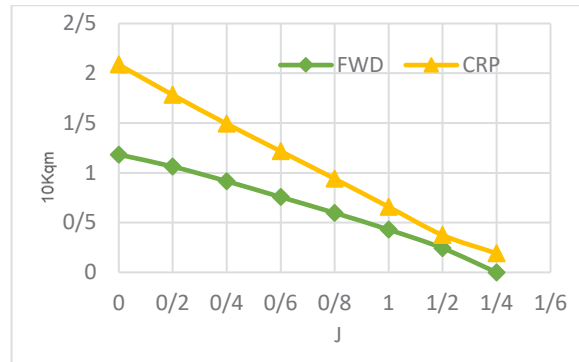
#### ۴- نتایج

در این بخش، دو کار عمده انجام شده است. اول اینکه میزان افزایش ضرایب  $K_t$ ،  $K_q$  سیستم رانش CRP نسبت به حالت‌های تکی در تست‌های مدل رسم گردید. سپس تعمیم نتایج تست آب آزاد<sup>7</sup> هر یک از پروانه‌ها به کمک کد تعمیم نتایج انجام و منحنی‌های مطلوب رسم شدند. مجدداً میزان افزایش ضرایب  $K_t$ ،  $K_q$  سیستم رانش CRP نسبت به حالت‌های تکی در حالت واقعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقایسه میزان افزایش‌ها در تست مدل نسبت به حالت واقعی در قسمت تحلیل خطا به صورت نمودارهای میله‌ای ارائه گردیدند.

<sup>7</sup> Open water

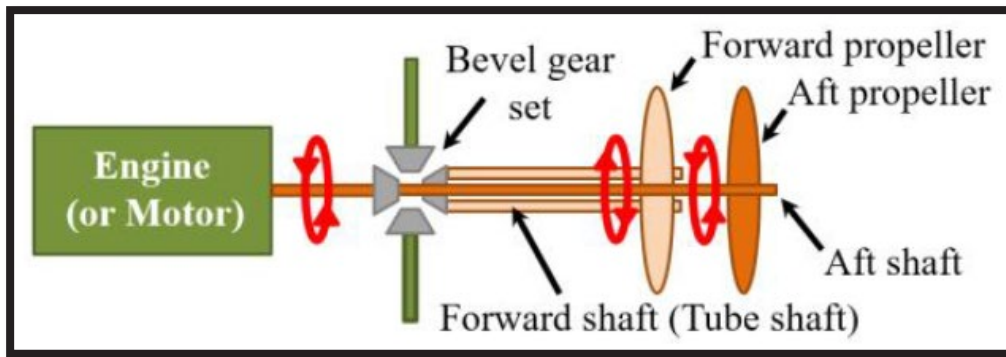


شکل ۷- مقایسه ضریب Kqcm سیستم CRP با پروانه عقبی

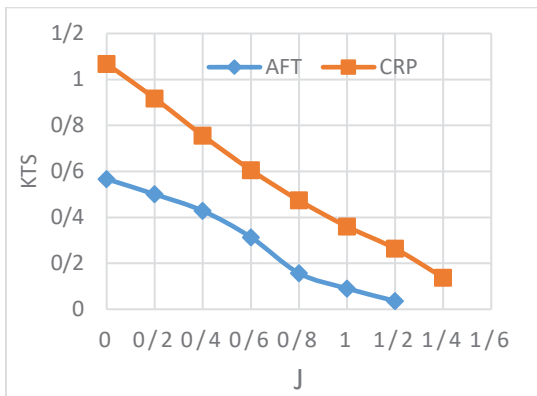


شکل ۶- مقایسه ضریب Kqcm سیستم CRP با پروانه جلویی

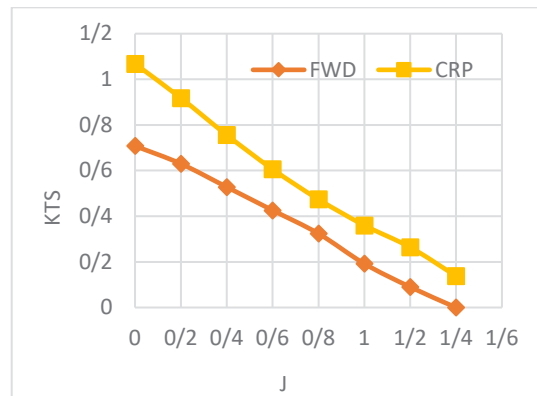
در ادامه نتایج تعمیم داده شده ارائه می‌شود. لازم به ذکر است در نمونه واقعی جهت نصب پروانه‌های جلو و عقب عکس حالتی است که در تست مدل وجود دارد [11]. شکل ۸ گویای این مسئله است.



شکل ۸- چیدمان المان‌های تشکیل دهنده سیستم رانش CRP روی شناور (در حالت واقعی) [16]



شکل ۱۰- مقایسه ضریب Kts سیستم CRP با پروانه عقبی



شکل ۹- مقایسه ضریب Kts سیستم CRP با پروانه جلویی

نمونه واقعی می‌باشد به کمک روابط (۱۶) و (۱۷) استخراج شده است.

$$\Delta K_{tm}(AFT) = \frac{K_{tm,AFT} - K_{tm,CRP}}{K_{tm,AFT}} \times 100 \quad (16)$$

$$\Delta K_{ts}(AFT) = \frac{K_{ts,AFT} - K_{ts,CRP}}{K_{ts,AFT}} \times 100 \quad (17)$$

دیتای شکل ۱۵ که بیانگر مقایسه میزان افزایش ضریب Kq سیستم CRP نسبت به پروانه جلویی در تست مدل و نمونه واقعی می‌باشد به کمک روابط (۱۸) و (۱۹) استخراج شده است.

$$\Delta K_{qm}(FWD) = \frac{K_{qm,FWD} - K_{qm,CRP}}{K_{qm,FWD}} \times 100 \quad (18)$$

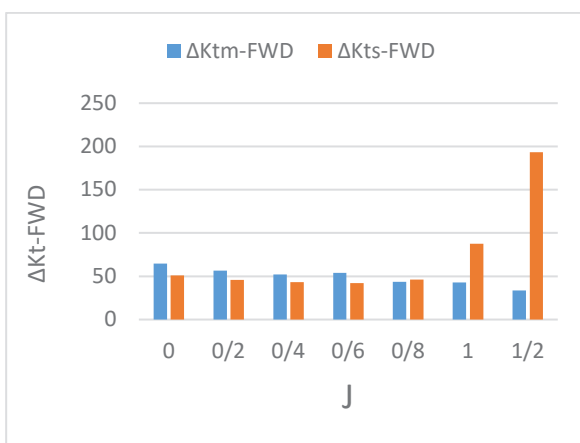
$$\Delta K_{qs}(FWD) = \frac{K_{qs,FWD} - K_{qs,CRP}}{K_{qs,FWD}} \times 100 \quad (19)$$

دیتای شکل ۱۶ که بیانگر مقایسه میزان افزایش ضریب Kq سیستم CRP نسبت به پروانه عقبی در تست مدل و نمونه واقعی می‌باشد به کمک روابط (۲۰) و (۲۱) استخراج شده است.

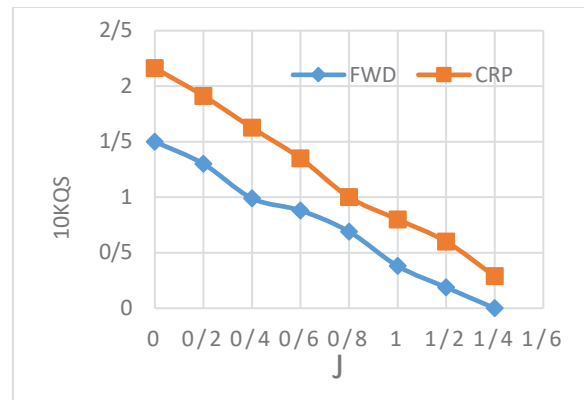
$$\Delta K_{qm}(AFT) = \frac{K_{qm,AFT} - K_{qm,CRP}}{K_{qm,AFT}} \times 100 \quad (20)$$

$$\Delta K_{qs}(AFT) = \frac{K_{qs,AFT} - K_{qs,CRP}}{K_{qs,AFT}} \times 100 \quad (21)$$

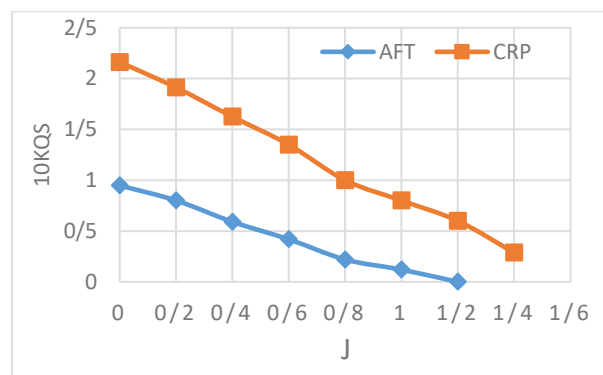
بنابراین می‌توان خطاها در تعمیم نتایج را به صورت شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) بیان نمود. از آنجا که نمودارهای قبل در J های مشخص رسم شده‌اند بنابراین خطاها به صورت گسسته در نمودارهای میله‌ای در همان نسبت‌های پیشروی مورد مطالعه قرار گرفتند.



شکل ۱۳- مقایسه میزان افزایش ضریب Kt سیستم CRP نسبت به پروانه جلویی در تست مدل و نمونه واقعی



شکل ۱۱- مقایسه ضریب Kqs سیستم CRP با پروانه جلویی



شکل ۱۲- مقایسه ضریب Kqs سیستم CRP با پروانه عقبی

## ۵- تحلیل خطا

در این قسمت مقایسه میزان افزایش‌ها در تست مدل نسبت به حالت واقعی در قسمت تحلیل خطا به صورت نمودارهای میله‌ای ارائه می‌گردند. هدف مقایسه میزان افزایش ضرایب Kt و Kq سیستم رانش CRP در تست مدل و نمونه واقعی با یکدیگر است. در نمودارهای این قسمت میزان افزایش ضرایب تراست و گشتاور سیستم CRP نسبت به پروانه‌های جلویی و عقبی از روابط زیر استخراج می‌گردد.

دیتای شکل ۱۳ که بیانگر مقایسه میزان افزایش ضریب Kt سیستم CRP نسبت به پروانه جلویی در تست مدل و نمونه واقعی می‌باشد به کمک روابط (۱۴) و (۱۵) استخراج شده است.

$$\Delta K_{tm}(FWD) = \frac{K_{tm,FWD} - K_{tm,CRP}}{K_{tm,FWD}} \times 100 \quad (14)$$

$$\Delta K_{ts}(FWD) = \frac{K_{ts,FWD} - K_{ts,CRP}}{K_{ts,FWD}} \times 100 \quad (15)$$

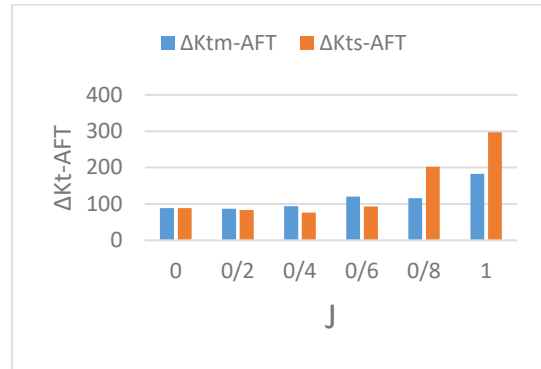
دیتای شکل ۱۴ که بیانگر مقایسه میزان افزایش ضریب Kt سیستم CRP نسبت به پروانه عقبی در تست مدل و



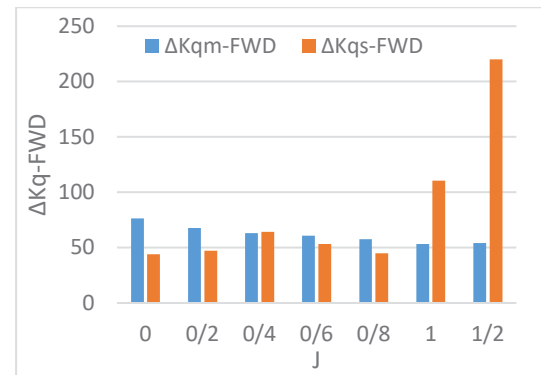
هستیم. نکته دوم اینکه تا قبل از نسبت پیشروی ۰.۸، افزایش ضرایب در تست‌های مدل کمی بیشتر از این مقادیر در نمونه اصلی محاسبه گردید اما بعد از نسبت پیشروی ۰.۸، تغییرات عکس می‌شود به طوری که افزایش ضرایب در نمونه اصلی بیشتر از این مقادیر در تست‌های مدل است. از آنجا که ITTC روابط ارائه شده را در محدوده اعداد رینولدز بالاتر از  $Re = 2 \times 10^5$  قابل استناد می‌داند؛ بنابراین می‌توان دلیل این اختلاف فاحش را به عدد رینولدز یا نسبت پیشروی مرتبط دانست. با توجه به اینکه عدد رینولدز و نسبت پیشروی طبق روابط (۱۰) و (۱۱) به یکدیگر مرتبط می‌باشند پس:

$$Re \propto V_R \propto \frac{1}{J} \quad (22)$$

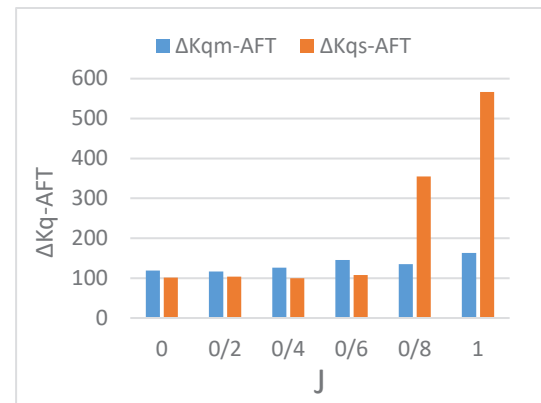
این بدین معنی است که روابط تعمیم نتایج ITTC صرفاً تا یک مقدار معینی از نسبت‌های پیشروی قابل قبول است و بیشتر از آن نمی‌توان به نتایج استناد نمود؛ بنابراین در هر مطالعه موردی، یک مقدار خاصی از  $J$  وجود دارد که عدد رینولدز را به عدد  $Re = 2 \times 10^5$  می‌رساند. این مقدار  $J$  معادل جریان گذرا روی مقطع تیغه‌های پروانه‌ها می‌باشد، یعنی جریانی که در حال انتقال لایه مرزی از آرام به آشفته است. در نمونه اصلی به دلیل بزرگ بودن ابعاد، چه در دوره‌های پایین و چه در دوره‌های بالا، عدد رینولدز در محدوده قابل قبول بوده و جریان کاملاً آشفته است؛ اما در مدل، جریان صرفاً در دوره‌های بالا آشفته و در دوره‌های پایین در محدوده گذرا قرار می‌گیرد. فرق عمده لایه مرزی گذرا و کاملاً آشفته در رفتار میکروسکوپی سیال است [12]. در پایین دست جریان و در پشت مقطع تیغه‌های پروانه که به فرم هیدروفویل می‌باشند، لایه مرزی دچار جدایش می‌گردد. اگر لایه مرزی کاملاً آشفته باشد بین لایه‌های جدا شده پایین و بالا، و یک<sup>۸</sup> تشکیل می‌شود و اگر لایه مرزی گذرا باشد بین لایه‌های جدا شده پایین و بالا، ریزش گردابه<sup>۹</sup> اتفاق می‌افتد [13]. در شکل زیر تفاوت شماتیک بین ویک و ریزش گردابه نمایش داده شده است.



شکل ۱۴- مقایسه میزان افزایش ضریب Kt سیستم CRP نسبت به پروانه عقبی در تست مدل و نمونه واقعی



شکل ۱۵- مقایسه میزان افزایش ضریب Kq سیستم CRP نسبت به پروانه جلویی در تست مدل و نمونه واقعی

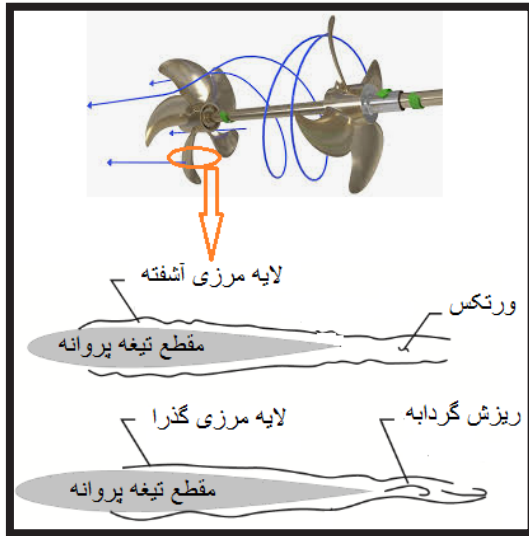


شکل ۱۶- مقایسه میزان افزایش ضریب Kq سیستم CRP نسبت به پروانه عقبی در تست مدل و نمونه واقعی

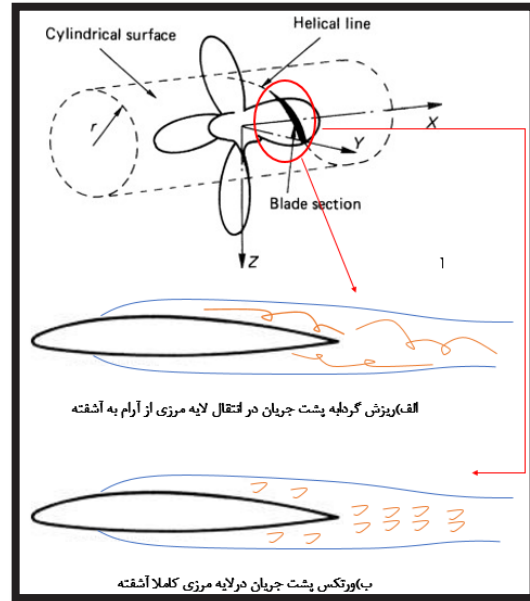
با توجه به نمودارهای میله‌ای بالا، می‌توان به نکات مهمی پی برد. نکته اول اینکه از شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) چنین برمی‌آید افزایش ضرایب تا قبل از نسبت پیشروی ۰.۸ در مدل و نمونه اصلی به یک اندازه تخمین زده شده است. در نتیجه روابط تعمیم نتایج در این محدوده نسبت پیشروی دقت قابل قبولی دارند؛ اما از نسبت پیشروی ۰.۸ به بعد شاهد اختلاف فاحش بین نتایج مدل و نمونه اصلی

<sup>9</sup> Vortex Shedding

<sup>8</sup> Wake



شکل ۱۸- نمایش ویک و ورتکس اطراف مقطع تیغه پروانه جلویی CRP رانش



شکل ۱۷- تفاوت ویک و ریش گردابه (ورتکس) در لایه مرزی گذرا و مغشوش

#### ۶- جمع بندی و پیشنهادها

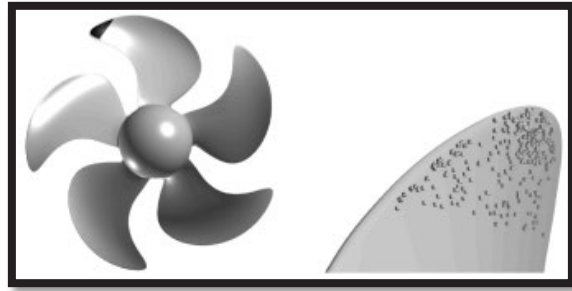
اصلی ترین چالش در تعمیم نتایج پروانه های CRP در نسبت پیشروی های بالا (رینولدزهای پایین) می باشد که وقوع لایه مرزی گذرا محتمل است. از آنجاکه عدد رینولدز به سرعت وابسته است بنابراین می توان به دو روش لایه مرزی را از حالت گذرا به کاملاً آشفته تبدیل نمود. سرعت یک کمیت برداری است یعنی دارای اندازه و جهت است؛ بنابراین با تغییر اندازه سرعت و جهت آن می توان در رینولدز یا رژیم جریان تغییر ایجاد نمود. تغییر اندازه سرعت بدین معنی است که تست ها را در دوره های بالاتری انجام دهیم تا از صحت و سقم تعمیم نتایج آن مطمئن باشیم؛ اما تغییر بردار سرعت بدین معنی است که سطح پروانه مدل را طوری تغییر دهیم تا منجر به اغتشاشات مصنوعی گردد؛ این کار می تواند با روش های خاص صورت گیرد از جمله پوشش تیغه های پروانه با ورق های سنباده، ایجاد سوراخ های بسیار ریز روی تیغه ها یا سندبالاست کردن سطح. نمونه ای از زیر کردن سطح پروانه در شکل (۱۹) نمایش داده شده است.

حال می توان ماهیت جریان پایین دست را با توجه به نسبت پیشروی به صورت جدول زیر دسته بندی نمود.

جدول ۳: مقایسه ماهیت جریان پشت مقطع تیغه پروانه در اعداد پیشروی مختلف

	$J < 0.8$	$J > 0.8$	
تست مدل	ویک	ریش گردابه	
نمونه واقعی	ویک	ویک	

در نتیجه در مقطع تیغه پروانه های CRP نیز می توان چنین وضعیتی را در نظر گرفت. با توجه به اینکه فاصله بین دو پروانه جز متغیرهای طراحی می باشد بنابراین اگر این فاصله، به اندازه کافی بزرگ نباشد آنگاه نمی توان برای ریش گردابه و ویک تفاوت قائل شد چون هیچ یک از رفتارهای میکروسکوپی سیال (همچون تشکیل ویک یا ریش گردابه) فرصتی برای بالفعل شدن نخواهند داشت [14]. اما در هر وضعیتی می توان در پایین دست پروانه عقبی چنین تحلیل هایی را در منطقی دانست. در هر حالتی تلفات چرخشی پروانه جلویی حذف می شود چون انرژی چرخشی توسط پروانه عقبی جذب می شود (شکل ۱۸) اما بهترین طراحی مربوط به حالتی است که گردابه ها در پایین دست جریان به ریزترین سایز رسیده و دوران سیال به سمت صفر میل کند.



شکل ۱۹- شماتیک زبرسازی سطوح پروانه جهت نیل به رینولدزهای بالا و دقت مناسب در تعمیم نتایج تست مدل [17]

## نمادها

جدول ۴- معرفی نمادهای بکار رفته در فرمول‌ها

معرفی نماد	نماد	معرفی نماد	نماد
گام پروانه در 0/7R	P	ضریب تراست مدل	$K_{tm}$
عدد رینولدز مدل	$Re_{nco}$	ضریب گشتاور مدل	$K_{qm}$
بیشترین ضخامت پروانه در 0/7R	t	ضریب تراست نمونه اصلی	$K_{ts}$
طول کورد پروانه در محل 0/7R	C	ضریب گشتاور نمونه اصلی	$K_{qs}$
برآیند سرعت‌های پیشروی و چرخشی پروانه	$V_R$	قطر پروانه مدل	$D_{fm}$
سرعت پیشروی پروانه مدل	$V_{Af}$	قطر پروانه اصلی	$D_{fs}$
دور پروانه مدل جلویی	$n_{fm}$	چگالی سیال	$\rho$
دور پروانه مدل عقبی	$n_{am}$	تراست پروانه مدل جلویی	$T_{fm}$
پروانه جلویی	FWD	تراست پروانه مدل عقبی	$T_{am}$
پروانه عقبی	AFT	گشتاور پروانه مدل جلویی	$Q_{fm}$
افزایش ضریب تراست سیستم CRP نسبت به پروانه‌های جلویی یا عقبی در تست مدل	$\Delta K_{tm}$	گشتاور پروانه مدل عقبی	$Q_{am}$
افزایش ضریب گشتاور سیستم CRP نسبت به پروانه‌های جلویی یا عقبی در تست مدل	$\Delta K_{qm}$	نسبت پیشروی پروانه	J
افزایش ضریب تراست سیستم CRP نسبت به پروانه‌های جلویی یا عقبی در نمونه واقعی	$\Delta K_{ts}$	تعداد پره‌های پروانه	Z
افزایش ضریب گشتاور سیستم CRP نسبت به پروانه‌های جلویی یا عقبی در نمونه واقعی	$\Delta K_{qs}$	لزجت دینامیکی سیال	$\mu$
		زبری است که 3e-5 در نظر گرفته می‌شود	$k_p$

- 2- Hu, Jian, Fugeng Li, Shili Sun, Yingzhu Wang, and Qinghao Yan. "Numerical simulation of unsteady hydrodynamic performance of CRP." *Ocean Engineering* 266 (2022): 113165
- 3- Zhang, Yuxin, Xuankai Cheng, and Liang Feng. "Numerical investigation of the unsteady flow of a hybrid CRP

## منابع

- 1- Mohan, Mahish, Hannu Jukola, and Kari Kyyrö. "Numerical Investigation on Performance Prediction of Push-Pull CRP Configuration.", 7th International Symposium of Marine Propulsors smp'2022, Wuxi, China, October 17-21, 2022,

- 4- pod propulsion system at behind-hull condition." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 12 (2020): 918-927.
- 5- Takahashi K, Sahoo PK, Evans J. Numerical estimation of hydrodynamic performance of marine propellers using CFD. In Proceedings of the International Conference on Ships and Offshore Structures 2018 Sep (pp. 17-19).
- 6- Wang, Zhan-Zhi, Ying Xiong, Rui Wang, and Chen-hua Zhong. "Numerical investigation of the scale effect of hydrodynamic performance of the hybrid CRP pod propulsion system." *Applied Ocean Research* 54 (2016): 26-38.
- 7- Oh, Semyun, Jinsuk Lee, Kwang-Jun Paik, Soonho Choi, Hyoung-Gil Park, and Tetsuji Hoshino. "Study on the Hydrodynamic Characteristics of Contra-Rotating Propeller System." In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp. ISOPE-I. ISOPE, 2014.
- 8- Inukai, Yasuhiko. "Development of contra-rotating propeller with tip-raked fins." In *Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany*, pp. 15-17. 2011.
- 9- ITTC. "Podded Propulsion Tests and Extrapolation", Resistance and Propulsion Committee of the 29<sup>th</sup> ITTC, 2021
- 10- Kravitz, Eyal. *Analysis and experiments for contra-rotating propeller*. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- 11- Tran, Tien-Anh, and Thi-Uyen-Uyen Nguyen. "Performance Investigation of the Propulsion System Using Contra Rotating Propeller." *International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022
- 12- De Croo, Ruben, Thomas Van Lierde, and Frederik De Belie. "Study and Validation of a Contra-Rotating Dual Rotor Switched Reluctance Machine in Marine Propulsion." *2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. IEEE, 2023
- 13- Ebus T, Dietz M and Hupfer A. Experimental and numerical studies on small contra-rotating electrical ducted fan engines[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2021, 12:559-571.
- 14- YAN Wenhui, TANG Sijia and WANG Fengming, et al. Unsteady aerodynamic interactions of contra rotating propeller[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021,36(7):1398-1405.
- 15- Tang J, Wang X and Duan D, et al. Optimisation and analysis of efficiency for contra-rotating propellers for high-altitude airships[J]. *Aeronautical Journal*, 2019, 123(1263):706-726
- 16- Min, Keh-Sik, Bong-Jun Chang, and Heung-Won Seo. "Study on the Contra-Rotating Propeller system design and full-scale performance prediction method." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 1.1 (2009): 29-38.
- 17- Shin, Homin, Junghwan Chang, and Dokwan Hong. "Design and characteristics analysis of coaxial magnetic gear for contra-rotating propeller in yacht." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.9 (2019): 7250-7259.
- 18- Asnaghi, Abolfazl, et al. "Propeller tip vortex mitigation by roughness application." *Applied Ocean Research* 106 (2021): 102449.