

# تحلیل عددی تأثیر طول کورد هیدروفویل استاتور بر عملکرد

## هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپجت استاتور-روتور

محمدحسین قاندرشرف<sup>۱</sup>، احسان یاری<sup>۲</sup>، مجتبی دهقان منشادی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

### چکیده:

پمپجت یک نوع سیستم پیشراننده دریایی است که تراست لازم را بر اساس روش اختلاف مومنتوم و بر اساس اصول پمپهای جریان محوری ایجاد می‌کند. سیستم پمپجت از روتور، استاتور، داکت و هاب تشکیل شده است. در دو دهه اخیر سیستم رانش پمپجت با توجه به شتاب و قدرت مانور بالا، راندمان و عملکرد بالاتر و همچنین سطح نویز پایین‌تر بیشتر مورد توجه صنایع دریایی بخصوص در حوزه زیرسطحی قرار گرفته است. پمپجت‌ها به چهار دسته مختلف روتور-استاتور، استاتور-روتور، رانش از لبه و معکوس گرد طبقه‌بندی می‌شوند. در مقاله حاضر تأثیر طول کورد هیدروفویل استاتور بر عملکرد هیدرودینامیکی پمپجت استاتور-روتور مورد بررسی قرار گرفته است. استاتور در این نوع پمپجت‌ها نقش یکنواخت کننده جریان ورودی را داشته و بر روی عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشراننده نقش بسزایی دارد. لذا ۵ هندسه با طول کوردهای استاتور  $L$  برابر  $0.14DR$ ،  $0.15DR$ ،  $0.16DR$ ،  $0.17DR$  و  $0.18DR$  (قطر روتور:  $DR$ ) به روش طراحی مستقیم تولید گردید تا به کمک نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه‌سازی عددی بررسی شوند. در بین حالات بررسی شده بیشینه راندمان آب آزاد با مقدار  $64/51$  مربوط به حالت  $L=0.18DR$  و کمینه راندمان آب آزاد مربوط به حالت  $L=0.15DR$  با مقدار  $63/53$  بود. با بررسی سایر نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به نظر می‌رسد مقدار  $L=0.18DR$  به دلیل داشتن حداکثر راندمان آب آزاد (حدود  $1\%$  بیشتر نسبت به کمترین مقدار) و محدوده بزرگ‌تر پوشش دهی ضرایب پیشروی با راندمان بالاتر، یکنواخت و تکروندی بودن ضریب تراست تولیدی و نمودار ضریب گشتاور متعارف نسبت به سایر حالات مورد بررسی برتری دارد.

### واژه‌های کلیدی:

پمپجت، استاتور-روتور، طول کورد، قطر روتور، راندمان آب آزاد، ضریب تراست، ضریب گشتاور

## Numerical Analysis of the Effect of Stator Hydrofoil Cord Length on Hydrodynamic Performance of Pre-swirl Pump Jet Propulsion

Mohammad Husein Qaedsharaf<sup>1</sup>, Ehsan Yari<sup>2</sup>, Mojtaba Dehghan Manshadi<sup>3</sup>

1,2,3 Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

### Abstract

Pump jet is a type of marine propulsion system that establishes the necessary trust based on the momentum difference method and based on axial flow pumps. The pump jet system is composed of rotors, stators, ducts and hubs. In the last two decades, pump jet propulsion system due to higher efficiency and performance, as well as lower noise level, has been more important for marine industry, especially in the subsurface area. In this paper, the effect of stator hydrofoil chords length on the hydrodynamic performance of the stator-rotor pump jet has been investigated. The stator has an integral role in this type of pump jet and has a significant role on the hydrodynamic performance of the propulsion complex. Therefore, 5 geometries with the length of the stator cords  $L$  ( $DR$  0.14, 0.15DR, 0.16DR, 0.17DR and 0.18DR) (rotor diameter:  $DR$ ) were produced by direct design method to investigate computational fluid dynamics and numerical simulation using commercial software. Among the investigated cases, the maximum open water efficiency (64.51) was related to  $L=0.18 DR$  and the minimum open water efficiency was related to  $L=0.15 DR$  (63.53). By examining the other

results of the simulations, it seems that  $L=0.18DR$  is superior to other scenarios due to having maximum open water efficiency (about 1% higher than the lowest value) and the larger coverage area of the leading coefficients with higher efficiency, uniformity and monotrend of the production trust coefficient and conventional torque coefficient graph.

**Keywords:** Pump jet, Stator-Rotor Pump jet, Cord length, Rotor diameter, Open water efficiency, Trust coefficient, Torque coefficient

مختلف با هدف به حداکثر رساندن راندمان پیش‌رانه در پایین‌ترین شاخص شروع کاویتاسیون مقایسه شدند. سان دی و همکاران [۲] اثر کنترل گرداب نوک تیغه را بر روی عملکرد آب آزاد پیش‌ران پمپ‌جت بررسی نمود. برای کنترل میدان جریان فضای خالی نوک پره در یک پیش‌رانه جت پمپ و کاهش کاویتاسیون، تعداد معینی شیار در دیواره داخلی مجرای پیش‌رانه جت پمپ تعبیه شد. بر اساس روش DES محاسبه عددی فضای خالی نوک پره پیش‌ران جت پمپ انجام شد و آزمایش عملکرد پیش‌ران پمپ‌جت بصورت آب آزاد در حوضچه کشش طراحی و انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ساختار شیار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای فشار هسته گرداب نوک و حجم ناحیه کم فشار نوک را افزایش دهد. همچنین گردابه ناحیه دنباله پشت روتور را می‌توان تا تقریباً نصف کاهش داد که می‌تواند به طور مؤثر کاویتاسیون گرداب نوک پره را به تأخیر بیندازد. بی‌جی‌ام و همکاران [۳] تأثیر وجود حلقه در نوک تیغه‌های پره روتور و شیار درون دیواره داخلی داکت را بر عملکرد هیدرودینامیکی پمپ‌جت بررسی نمودند. کو‌جی و همکاران [۴] تحلیلی عددی بر روی نویزهای کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی جریان پمپ‌جت انجام دادند. در این مطالعه سهم نویز توسط داکت، استاتور و روتور برای شناسایی منبع نویز جریان در شرایط کاویتاسیون و غیر کاویتاسیون در پیش‌رانه پمپ‌جت ارزیابی شد. در نتیجه پیش‌بینی نویز سهم استاتور ناچیز است اما بر تولید منبع نویز جریان به دلیل جدا شدن جریان در داکت و روتور تأثیر می‌گذارد و نویز را عمدتاً به سمت بالا و سمت راست جایی که جدا سازی جریان است تابش می‌کند. همچنین نویز به دلیل نوسان فشار بین دو طرف مکش و فشار روی پره‌های روتور در جهت پیشروی تابش می‌شود. بی‌جی‌ام و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۲ پژوهشی بر روی عملکرد کنترل جریان نوک پره و مکانیزم شیارهای محوری پیش‌ران پمپ‌جت انجام دادند. در این مطالعه، روش جدیدی برای کنترل

## ۱- مقدمه

سابقه استفاده از سیستم رانش پمپ‌جت برای زیردریایی‌ها و سامانه‌های زیرسطحی به چند دهه اخیر برمی‌گردد اما طی سال‌های اخیر سیستم رانش پمپ‌جت بخصوص برای زیردریایی به‌طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌است. در سال ۲۰۱۸ به درخواست وزارت دفاع استرالیا تحقیقاتی در زمینه مقایسه پیش‌ران‌های پروانه‌ای و پمپ‌جت‌ها انجام شد که نتیجه این بود که در محدوده سرعت‌ها و ضرایب پیشروی بالا کارایی پیش‌ران پمپ‌جت بهتر از انواع پروانه‌ها است. پمپ‌جت‌ها بیشتر برای زیردریایی‌ها طراحی می‌گردند که نیاز به نویز کمتر و مخفی‌کاری بیشتر دارند که این امر استفاده این پیش‌ران را توجیه می‌کند. در شکل (۱) یک نمونه سیستم رانش پمپ‌جت بر روی زیردریایی مشاهده می‌شود.



شکل ۱- سیستم رانش پمپ‌جت بر روی زیردریایی کلاس ویرجینیا ایالات متحده آمریکا

## ۲- سابقه تحقیقات و مطالعات انجام گرفته

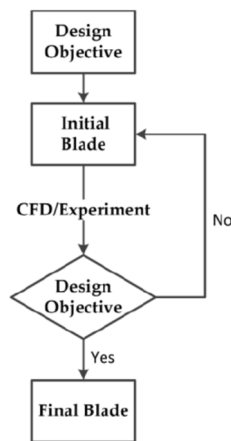
گاگرو و همکاران [۱] در ۲۰۲۳ پژوهشی بر روی طراحی و تحلیل پیش‌ران پمپ‌جت بر اساس بهینه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. آن‌ها طراحی پیش‌ران‌های پمپ‌جت را از طریق یک رویکرد بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی که بر اساس یک تو صیف پارامتری از ویژگی‌های هندسی اصلی سیستم، یک حل‌کننده RANSE با قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک بود انجام دادند و در فرآیند بهینه‌سازی چندمنظوره مقادیر

نزدیک لبه ورودی داکت می‌باشد پروفیل مقطع و طول کورد و زاویه حمله آن بر روی میدان جریان ورودی به روتور مؤثر می‌باشند. لذا در این مقاله تأثیر طول کورد استاتور بر روی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپجت استاتور-روتور مورد بررسی قرار گرفته‌است.

### ۳- روش پژوهش

#### ۳-۱- استخراج هندسه

طراحی هندسه مدل سیستم رانش پمپجت بر اساس بیشینه عملکرد هیدرودینامیکی به روش طراحی مستقیم [۱] انجام شده‌است.



شکل ۲- الگوریتم طراحی مستقیم [۱]

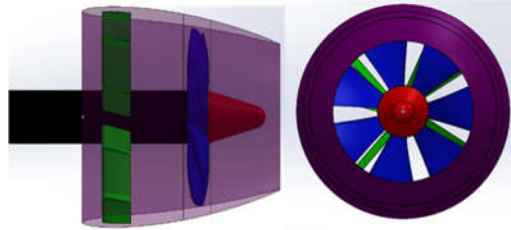
در جدول ۱ مشخصات هندسی سیستم رانش طراحی شده قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی سیستم رانش پمپجت

مقدار	مشخصه
۲۱	قطر روتور (سانتی‌متر)
NACA16-7	تعداد تیغه‌های روتور و مقطع آن
NACA66-11	تعداد تیغه‌های استاتور و مقطع آن
کاهنده- NACA6608	نوع داکت و مقطع آن
۲۵/۳۱، ۱۹/۱۵ و ۲۷/۴۲	قطر ورودی، قطر خروجی و طول داکت (سانتی متر)
۸/۵۳	فاصله روتور و استاتور (سانتی متر)

شمای کلی پیشران طراحی شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.

گرداب نشستی نوک پیشرانه جت پمپ با افزودن شکاف‌های محوری مستطیلی به دیواره داخلی داکت توسعه داده شده‌است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که شکاف‌های محوری می‌توانند به طور موثری گرداب نوک پره را کنترل کنند؛ فشار هسته گرداب را به طور قابل توجهی افزایش دهند و تأثیر جزئی بر رانش و گشتاور پیشرانه داشته باشند. در ۲۰۲۲ جونگ وو آن و همکاران [۶] مطالعه‌ای بر روی تست آب آزاد و تحلیل یک نمونه پیشران پمپجت را در تونل کاویتاسیون انجام دادند. به منظور مطالعه روش‌های آزمایش و تحلیل آب آزاد برای پیشرانه‌های پمپجت در تونل کاویتاسیون بزرگ در موسسه تحقیقات کشتی‌ها و مهندسی اقیانوس کره، مجموعه‌ای از تجهیزات آزمایشی طراحی و ساخته شد. بر اساس نتایج و از آنجایی که کل پمپجت به عنوان یک پیشرانه تعریف می‌شود، تصور می‌شود که آزمایش و آنالیز خود محرکه را می‌توان به همان روش پروانه معمولی انجام داد. در ۲۰۲۲ یونکای ژو و همکاران [۷] پژوهشی بر روی طراحی و عملکرد پیشران پمپجت انجام دادند و مزایا، چالش‌ها و چشم‌اندازها را ترسیم نمودند. یاری [۸] در ۲۰۲۱ آنالیز هیدرودینامیکی-سازه ای و ارتعاشاتی بر روی پیشران پمپجت یک زیرسطحی را انجام داد. بر اساس نتایج این پژوهش ریشه پره‌های روتور و استاتور بایستی برای تحمل تنش‌های وارده تقویت شوند. نوروزمحمد نوری و همکاران [۹] در ۱۳۹۵ مزایا، معایب، چالش‌های طراحی و الگوریتم شبیه‌سازی عددی پمپجت CRP را بررسی و الگوریتمی را برای طراحی ارائه نمودند. طالع زاده و همکاران [۱۰] در ۱۳۹۵ شبیه‌سازی عددی دنباله جریان در ناحیه ویک پشت بدنه و سیستم رانش را با نرم‌افزار تجاری موجود و مدل متداول توربولانسی دو معادله‌ای انجام دادند. در فعالیت پژوهشی دیگری طالع‌زاده و همکاران [۱۱] یک منحنی عملکرد از نمونه تحقیقاتی طراحی شده سیستم رانش پمپجت به کمک شبیه‌سازی عددی استخراج نمودند. مهران مطلبی‌نژاد و همکاران [۱۲] در ۱۳۹۴ سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت‌بالا را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به فعالیت‌های فوق‌الذکر، پارامترهای هندسی هر یک تأثیر بسزایی در میدان فشار و عملکرد سیستم رانش پمپجت دارند. در طرح پمپجت استاتور-روتور با توجه به موقعیت قرارگیری استاتور که



شکل ۳- شمای هندسه طراحی شده به روش طراحی مستقیم

جهت بررسی تأثیر طول کورد بر عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشران ۵ مدل با طول کورد های L برابر 0.18DR، 0.17DR، 0.16DR، 0.15DR، 0.14DR (DR: قطر روتور) شد تا به صورت جداگانه بر روی هر کدام شبیه‌سازی عددی انجام شود.

### ۳-۲- رهیافت شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش سیال عامل به صورت غیرقابل تراکم و همگن و نیوتنی در نظر گرفته شده است. از نیروهای بدنه و شتاب جاذبه و انتقال حرارت چشم‌پوشی شده است. جریان سیال توسط معادلات ناویر-استوکس محاسبه می‌شود که حل تحلیلی بسیار زمان‌بر و تقریباً غیرممکن است. استفاده از روش میانگین رینولدز برای ۵ معادله، رویکرد رایج برای حل جریان ویسکوز و معادلات ناویر استوکس است. این رویکرد تنش‌های رینولدز را معرفی می‌کند که باید حل شوند. مدل‌های توربولانسی با معرفی یک ویسکوزیته توربولانسی  $\mu$  به محاسبه تنش‌های رینولدز می‌پردازند. در این پژوهش از مدل توربولانسی SST  $k-\omega$  استفاده شده است. در بین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل  $k-\omega$  نسبت به مدل  $k-\epsilon$  مزایای متعددی دارد. برجسته‌ترین مزیت آن در انتگرال‌گیری از این مدل بدون مؤلفه‌های اضافی در زیرلایه ویسکوز می‌باشد. این مسئله منجر به غیرحساس شدن رفتار  $y^+$  و سراسر شدن آن شده است. به علاوه مدل SST  $k-\omega$  در پیش‌بینی جدایش و گرادیان فشار ناخواسته، بهتر عمل می‌کند. از جمله معایب معادله Standard  $k-\omega$ ، حساسیت شدید حل به مقدار جریان آزاد  $k$  و  $\omega$  در بیرون لایه برشی است. به این دلیل استفاده از مدل Standard  $k-\omega$  در نرم‌افزار انسیس فلونت توصیه نمی‌شود. مدل‌های BSL  $k-\omega$  و SST  $k-\omega$ ، با ترکیب مؤلفه‌های معادلات  $\omega$  و  $\epsilon$  برای اجتناب از حساسیت به جریان آزاد در مدل Standard  $k-\omega$  طراحی شده‌اند. همچنین مدل SST  $k-\omega$

جهت محاسبه دقیق جدایش از سطوح صاف به خوبی کالیبره شده است. بین مدل‌های  $k-\omega$  توصیه می‌شود که از مدل SST یا BSL استفاده شود. از آنجایی که اعداد رینولدز دو طرف داکت پمپ جت متفاوت است؛ بخش قابل توجهی از ناحیه جریان آرام در خارج از داکت وجود دارد. به ویژه در ضرایب پیشروی پایین. تفاوت در رژیم‌های جریان بر رانش داکت تأثیر می‌گذارد. طبق مطالعات انجام شده هنگامی که تفاوت قابل توجهی در اعداد رینولدز دو طرف داکت وجود دارد و مجرای بیرونی دارای عدد رینولدز کمتر از حداقل عدد رینولدز پذیرفته شده توسط ITTC ( $5 \times 10^5$ ) هنگامی که سرعت پیشروی کم باشد تأثیر تفاوت رژیم‌های جریان بر رانش داکت ناچیز بوده زیرا رانش داکت تحت تأثیر مؤلفه فشار آن است و مؤلفه اصطکاک آن بسیار ناچیز خواهد بود. بنابراین، در این پژوهش گذرش روی داکت نادیده گرفته شده است.

### ۳-۳- پارامترهای عملکردی پمپ جت

برای بررسی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپ جت ضرایب بی‌بعدی به شرح زیر تعریف شده‌اند:

$$J = \frac{V_A}{nD}, K_{TR} = \frac{T_R}{\rho n^2 D^4}, K_{TS} = \frac{T_S}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4}, K_{QR} = \frac{Q_R}{\rho n^2 D^5}, K_Q = K_{QR}$$

$$K_T = K_{TR} + K_{TS} + K_{TD}, \eta_o = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (1)$$

که:

J ضریب پیشروی:

$K_T$  ضریب تراست کل:

$K_{TR}$  ضریب تراست روتور:

$K_{TS}$  ضریب تراست استاتور:

$K_{TD}$  ضریب تراست داکت:

$K_Q$  ضریب گشتاور پیشران:

$K_{QR}$  ضریب گشتاور روتور:

$\eta_o$  راندمان پیشران در حالت آب آزاد:

D قطر پیشران (متر):

n سرعت دورانی پروانه پیشران (دور بر ثانیه):

$V_A$  سرعت پیشروی پروانه مدل (متر بر ثانیه):

$\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب):

کورد مقطع پره به قطر پره،  $P/D$  نسبت گام حرکت پره به قطر پره،  $T/c$  نسبت بیشتترین ضخامت مقطع پره به کورد پره و  $F/c$  نسبت بیشتترین میزان چرخش به کورد پره است.

جدول ۲- مشخصات هندسی پروانه مدل DTMB 4119 [۱۳]

D (m)	0.3048
Z	3
Skew (°)	0
Rake (°)	0
Blade section	NACA66 a=0.8
Rotation direction	Right

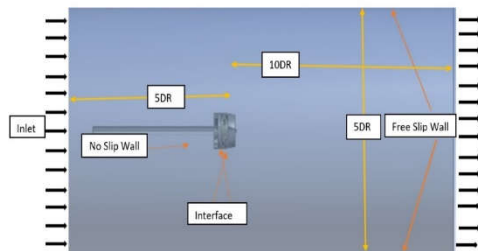
جدول ۳- مشخصات مقاطع مختلف پروانه DTMB 4119 [۱۳]

$r/R$	$c/D$	$P/D$	$T/c$	$F/c$
0/2	0/3200	1/1050	0/20550	0/01429
0/3	0/3625	1/1020	0/15530	0/02318
0/4	0/4048	1/0980	0/11800	0/02303
0/5	0/4392	1/0930	0/09160	0/02182
0/6	0/4610	1/0880	0/06960	0/02072
0/7	0/4622	1/0840	0/05418	0/02003
0/8	0/4347	1/0810	0/04206	0/01967
0/9	0/3613	1/0790	0/03321	0/01817
0/95	0/2775	1/0770	0/03228	0/01631
1	0/0000	1/0750	0/03160	0/01175

به منظور تولید شبکه و شبیه سازی میدان جریان سیال اطراف پروانه، از یک دامنه حل استوانه‌ای استفاده شد. مرز ورودی جریان در فاصله  $5D$  از پروانه در جریان بالادست، مرز خروجی جریان در فاصله  $10D$  از پروانه در جریان پایین دست و قطر مرز جانبی استوانه  $5D$  در نظر گرفته شده که  $D$  قطر پروانه است. برای تولید شبکه از ابزار شبکه بندی<sup>۲</sup> موجود در نرم افزار انسیس استفاده شده است. این ابزار امکان تولید شبکه روی هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده است. برای تولید شبکه ابتدا یک شبکه پایه بدون ساختار<sup>۳</sup> چهاروجهی<sup>۴</sup> و منشوری<sup>۵</sup> و سپس در فضای دامنه حل، برای کاهش تعداد شبکه و زمان حل و افزایش دقت حل، شبکه بدون ساختار چندوجهی<sup>۶</sup> تولید شده است. برای بحث و بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، جریان به صورت سه بعدی، کاملاً متلاطم، تراکم ناپذیر و برای شرایط بدون

### ۳-۴- گره محاسباتی و تنظیمات شبیه سازی عددی

کل حوزه محاسباتی به دو زیر دامنه تقسیم می شود: دامنه روتور و دامنه خارجی. دامنه خارجی دارای بخش مشابه تونل کاویتاسیون و طول  $15D$  است. روتور در فاصله  $5D$  از ورودی قرار می گیرد. همه زیر دامنه‌ها دارای مش بی سازمان و چندوجهی هستند. در نزدیکی دیواره‌ها، ارتفاع لایه‌های اول از زیر لایه‌های لایه مرزی با مقدار  $y^+$  در محدوده ۵ تا ۳۰ محاسبه می شود که مناسب حل کننده RANS با مدل آشفتگی SST k-w می باشد. شرایط مرزی نیز در شکل ۴ آمده است. جریان یکنواخت بالادست با مقدار سرعت  $V$  مربوط به ضریب پیشروی  $J$  و شدت اغتشاش  $1\%$  روی مرز ورودی تنظیم شده است. یک شرط مرز خروجی فشار به خروجی با فشار ثابت Pout برابر با  $1 \text{ atm}$  داده می شود. دیوار میدان دور دست به عنوان دیوار با تنش برشی صفر تنظیم شده است. در طول شبیه سازی، سرعت چرخش روتور  $n$  برابر  $27.8 \text{ r/s}$  تثبیت شده است. تمام شبیه سازی‌ها توسط ANSYS-Fluent به صورت طرح SIMPLEC و گسسته سازی مرتبه دوم مومنتوم و گسسته سازی استاندارد فشار با  $1000$  تکرار انجام می شود. کیفیت هر یک از زیر دامنه‌های محاسباتی بیش از  $0.5$  است.



شکل ۴- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی عددی

### ۳-۵- صحت سنجی شبیه سازی عددی

به منظور صحت سنجی روش شبیه سازی عددی جریان پروانه DTMB 4119 با مشخصات هندسی که در جدول ۲ آورده شده انتخاب گردیده است. مشخصات مقاطع مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است که در آن  $r/R$  موقعیت مقطع پره در راستای شعاعی،  $c/D$  نسبت

<sup>4</sup>Tetrahedron

<sup>5</sup>Wedge

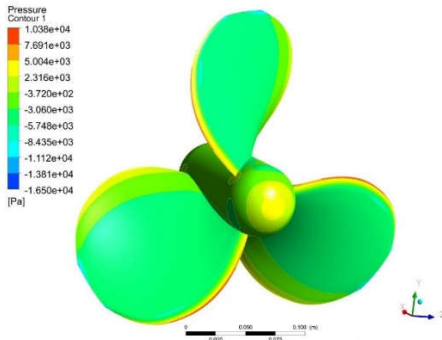
<sup>6</sup>Polyhedral

<sup>1</sup>Grid Generation

<sup>2</sup>Meshing

<sup>3</sup>Unstructured





شکل ۶- کانتور توزیع فشار بر روی سطح پشت پره

### ۳-۶- آنالیز استقلال حل از تعداد گره محاسباتی

در همه شبیه‌سازی‌های عددی لازم است تا از عدم وابستگی نتایج به تعداد و نوع گره‌های محاسباتی تولید شده اطمینان حاصل نمود. در این زمینه از روش شاخص همگرایی شبکه برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط رچ [۱۴] به منظور ارزیابی خطای گسسته‌سازی و عدم قطعیت‌های عددی ارائه شد. برای استفاده از این روش حداقل به ۳ شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف نیاز است. این شبکه با اسامی S1, S2, S3 با تعداد المان‌های N1, N2, N3 از ریزترین (۱) تا درشت‌ترین (۳) شبکه نام‌گذاری می‌شوند. فاکتور ریزکردن شبکه (R) به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$r_{21} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^{1/3} \quad (2)$$

در صورتی که  $r > \sqrt{3}$  باشد خطای برون‌یابی کاهش می‌یابد [۹۵]. طبق روش رچ، نسبت همگرایی به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود.  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  و  $\eta_3$  راندمان آب آزاد برای سه حالت هستند:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_3 - \eta_2} \quad (3)$$

در این معادله  $\varepsilon_{ij}$  بیانگر اختلاف نتایج به دست آمده از حل با شبکه  $i$  و  $j$  است. برای نسبت همگرایی سه حالت زیر متصور است:

$R > 1$  واگرایی شبکه

$R < 0$  همگرایی نوسانی

$0 < R < 1$  همگرایی یکنواخت شبکه

هنگامی که حل انجام شده با شبکه‌های مورد بررسی در وضعیت همگرایی باشد، برون‌یابی ریچاردسون برای تخمین

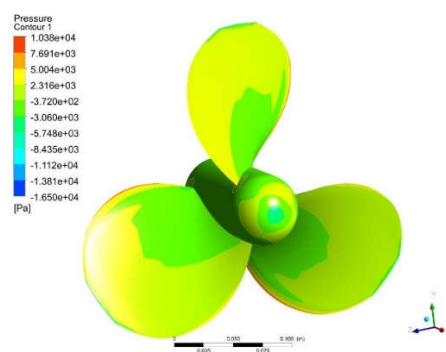
<sup>8</sup>Pressure-Velocity Coupling

کاویتا سیون ثابت در نظر گرفته می‌شود. مدل k- $\omega$  SST به‌عنوان مدل آشفتگی انتخاب شده است. میدان فشار با استفاده از الگوریتم ساده<sup>۷</sup> که مبتنی بر کوپل فشار - سرعت<sup>۸</sup> است حل شده است. سطوح ورودی و خروجی به ترتیب به‌عنوان شرط مرزی ورودی سرعت و شرط مرزی خروجی فشار تعریف شده‌اند. پس از ایجاد هندسه مدل، شبکه‌بندی و تعیین شرایط مرزی و فیزیکی، حل مسئله با ۱۰۰۰ تکرار شروع می‌شود. در جدول ۴ نتایج ضرایب تراست و گشتاور در مقایسه با داده‌های تجربی در ضرایب پیش‌روی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد ماکزیمم خطا در ضریب تراست ۱۰/۵ درصد و در ضریب گشتاور ۹/۸ درصد می‌باشد که محدوده قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۴- نتایج حل عددی ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیش‌روی مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی

J	$K_T$	$K_Q$	درصد میزان خطا $K_T$	درصد میزان خطا $K_Q$
0.5	۰/۲۸۳۰	۰/۰۴۸۳	۰/۷۴	۴/۴۶
0.7	۰/۱۹۶۰	۰/۰۳۶۷	۵/۳	۱/۱۳
0.833	۰/۱۳۹۲	۰/۰۲۷۱	۱۰/۰۱	۳/۲۰
0.9	۰/۱۱۰۰	۰/۰۲۴۸	۹/۶۰	۲/۱۷
1.1	۰/۰۳۳۱	۰/۰۱۰۱	۱۰/۵۴	۹/۸۲

در شکل ۵ کانتور توزیع فشار بر روی سطح جلویی پره و در شکل ۶ کانتور سطح پستی نمایش داده شده است.



شکل ۵- کانتور توزیع فشار بر روی سطح جلویی پره

<sup>7</sup>Simple

شدت همگرایی استفاده می‌شود. مرتبه دقت این الگوریتم طبق معادله (۴) محاسبه می‌شود که همان ضریب ریز شدن شبکه است که پیش از این تعریف شد.

$$P = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)}{\ln(r)} = \frac{\ln\left(\frac{\eta_3 - \eta_2}{\eta_2 - \eta_1}\right)}{\ln(r)} \quad (۴)$$

در نهایت، شاخص همگرایی شبکه با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود. در این معادله ضریب FS ضریب اطمینان همگرایی بوده و مقدار آن برابر با FS=1.25 پیشنهاد شده است [۱۴]. همچنین در این معادله نماد  $|\varepsilon_{ij}|$  خطای نسبی تقریبی است.

$$GCI_{fine} = F_s \frac{|\varepsilon_{12}|}{r^{p-1}} = \frac{F_s}{(r^{p-1})} \left| \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \right| \quad (۵)$$

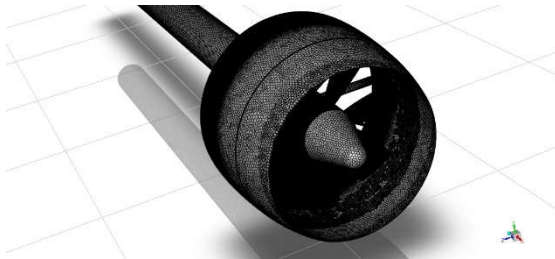
$$GCI_{coarse} = F_s r^p \frac{|\varepsilon_{23}|}{r^p - 1} = \frac{F_s r^p}{(r^p - 1)} \left| \frac{\eta_2 - \eta_3}{\eta_2} \right|$$

شاخص همگرایی شبکه نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده چه میزان از مقدار دقیق فاصله دارد. به بیان دیگر این روش تغییرات نتایج را با ریزتر شدن شبکه نشان می‌دهد. مقادیر کوچک این کمیت نشان می‌دهد که ریزتر شدن بیشتر شبکه دیگر تأثیری بر بهبود نتایج نخواهد داشت. شبکه‌های محاسباتی با کاهش و افزایش ارتفاع شبکه‌های لایه اول (First Layer Height) بازسازی می‌شوند. بر اساس Y+ برابر ۳۰ ضخامت اولین لایه ۰/۰۴۷ میلی‌متر (بعنوان شبکه درشت) محاسبه می‌شود. جهت آنالیز استقلال حل از شبکه مقادیر ۰/۰۳۲ بعنوان مقدار متوسط و ۰/۰۱۷ بعنوان ریز انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی عددی در دو مقدار ضریب پیشروی ۰/۸ و ۰/۹ برای شبکه‌های ریز، متوسط و درشت انجام شد که نتیجه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵- نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف

ضریب پیشروی	First Layer Height	تعداد سلول (میلیون)	$K_T$	$K_Q$
J=0.8	$\Delta s_1 = 0.047$	$N_1 = 56.1$	$K_{T1} = 0.3691$	$K_{Q1} = 0.0812$
	$\Delta s_2 = 0.032$	$N_2 = 68.7$	$K_{T2} = 0.3632$	$K_{Q2} = 0.0791$
	$\Delta s_3 = 0.017$	$N_3 = 79.3$	$K_{T3} = 0.3640$	$K_{Q3} = 0.0780$
J=0.9	$\Delta s_1 = 0.047$	$N_1 = 56.1$	$K_{T1} = 0.3183$	$K_{Q1} = 0.0742$
	$\Delta s_2 = 0.032$	$N_2 = 69.7$	$K_{T2} = 0.3141$	$K_{Q2} = 0.0735$
	$\Delta s_3 = 0.017$	$N_3 = 79.3$	$K_{T3} = 0.3152$	$K_{Q3} = 0.0739$

همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است خطاهای ضرایب رانش و گشتاور بین سه نوع شبکه بسیار کم است و صحت استقلال شبکه تأیید شده است. علاوه بر این، شاخص همگرایی شبکه (GCI) نیز محاسبه شده است. راندمان سه شبکه تعریف شده در J=0.9 به ترتیب عبارتست از ۰/۱۲۵، ۰/۱۳۱۲ و ۰/۱۳۷۳. همچنین  $GCI_{fine}$  و  $GCI_{coarse}$  به ترتیب عبارتند از ۰/۰۲۱۹ و ۰/۰۲۲۲ که مقادیر کوچک و مطلوبی هستند و همچنین نسبت همگرایی R برابر ۱/۰۱ که مقداری نزدیک به عدد ۱ و نشان‌دهنده همگرایی شبکه است. لذا مقدار  $\Delta s_2 = 0.032$  جهت شبکه‌بندی در کلیه حالات انتخاب گردید. نمونه‌ای از شبکه بندی انجام‌شده را در شکل ۷ قابل مشاهده است.



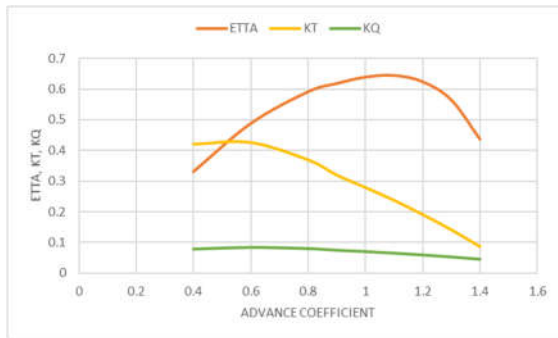
شکل ۷- شمای هندسه شبکه بندی شده

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- حالت اول L=0.14DR

در این حالت طول کورد برابر ۰/۰۲۹۴ متر در نظر گرفته شده و اس-تاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر ۰/۰۴۴، حداکثر ضریب تراست ۰/۴۳۴۷ و حداکثر ضریب گشتاور ۰/۰۸۵۹ می‌باشد. با افزایش ضریب پیشروی ضریب تراست روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده J=1.1 روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. نمودار ضریب تراست نیز با افزایش ضریب پیشروی بجز یک پیک نوسانی در J=0.6 مابقی به‌صورت قابل انتظار روندی کاملاً نزولی دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۸ آمده است.

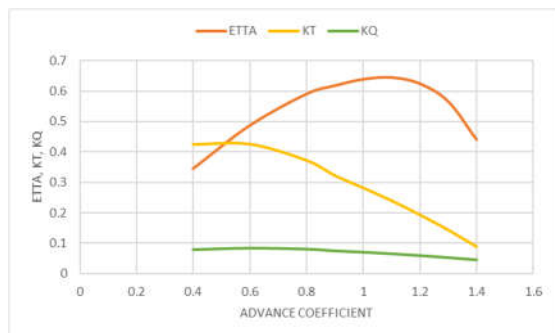
روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. مانند حالت قبل در نمودار ضریب تراست پیک نوسانی محسوس نیست و روندی تقریباً نزولی وجود دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز مانند حالات قبل روندی تقریباً نزولی دارد. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۰ آمده است.



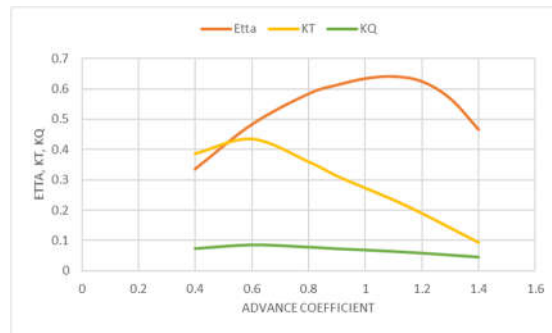
شکل ۱۰- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت  $L=0.16DR$

#### ۴-۴ حالت چهارم $L=0.17DR$ :

در این حالت طول کورد برابر  $0.357$  متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر  $64/42$ ، حداکثر ضریب تراست  $0.4257$  و حداکثر ضریب گشتاور  $0.834$  می باشد. در این حالت نیز مانند حالات قبلی نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده  $J=1.1$  روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. در نمودار ضریب تراست روندی تقریباً نزولی وجود دارد. ضریب گشتاور نیز مشابه حالات قبل است. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۱ آمده است.



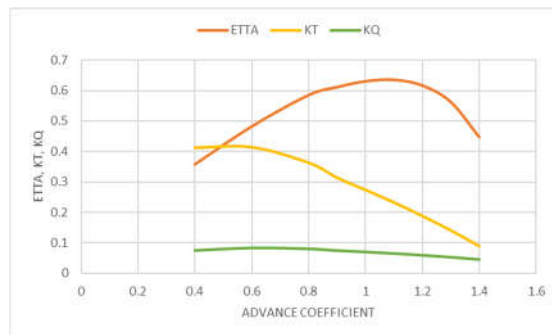
شکل ۱۱- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت  $L=0.17DR$



شکل ۸- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت  $L=0.14DR$

#### ۴-۲ حالت دوم $L=0.15DR$ :

در این حالت طول کورد برابر  $0.315$  متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر  $63/53$ ، حداکثر ضریب تراست  $0.4142$  و حداکثر ضریب گشتاور  $0.821$  می باشد. مانند حالت قبل نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده  $J=1.1$  روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. در نمودار ضریب تراست برخلاف حالت قبلی با افزایش ضریب پیشروی پیک نوسانی تقریباً حذف شده و روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت  $L=0.15DR$

#### ۴-۳ حالت سوم $L=0.16DR$ :

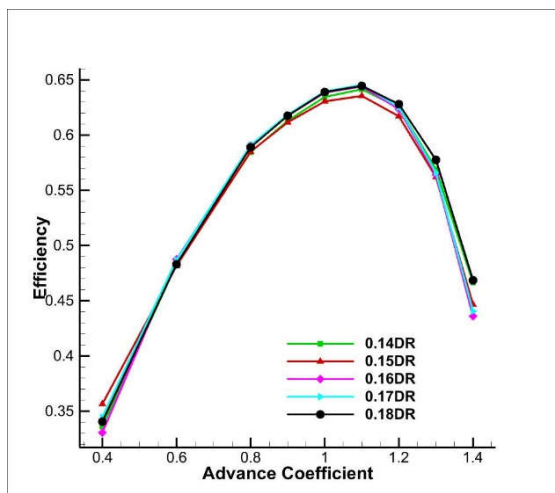
در این حالت طول کورد برابر  $0.336$  متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر  $64/36$ ، حداکثر ضریب تراست  $0.4251$  و حداکثر ضریب گشتاور  $0.832$  می باشد. مانند حالات قبلی نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده  $J=1.1$



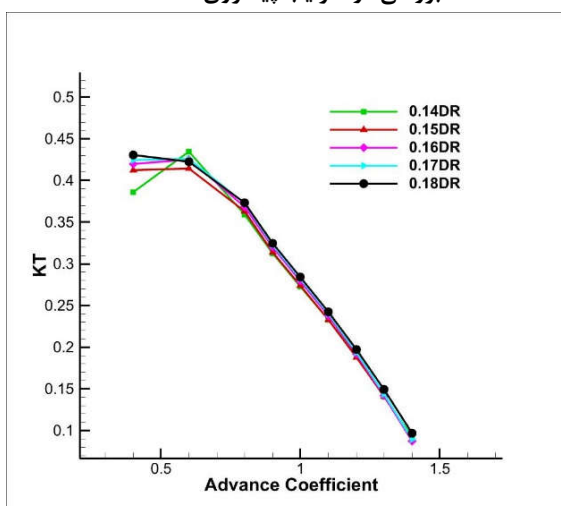
در  $J=1.4$  کمترین راندمان را دارد. حالت  $L=0.14DR$  و  $L=0.17DR$  روندی در میانه بقیه حالات دارند.

۲-۶-۴ ضریب تراست:

با توجه به نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۴ در محدوده  $J=0.4$  تا  $J=0.6$  بین ضریب تراست حالات مختلف اختلاف‌های محسوسی مشاهده می‌شود و از این ضریب پیشروی به بعد نمودار حالات مختلف تدریجاً بر هم منطبق می‌شوند. بیشترین ضریب تراست متعلق به حالت  $L=0.14DR$  است. تنها حالت  $L=0.18DR$  روندی صرفاً نزولی دارد و در سایر حالات در محدوده  $J=0.4$  تا  $J=0.6$  نوسان و تغییر روند مشاهده می‌شود که بیشترین نوسان نیز مربوط به حالت  $L=0.14DR$  بوده که در  $J=0.4$  کمترین ضریب تراست و در  $J=0.6$  بیشترین ضریب تراست را دارد.



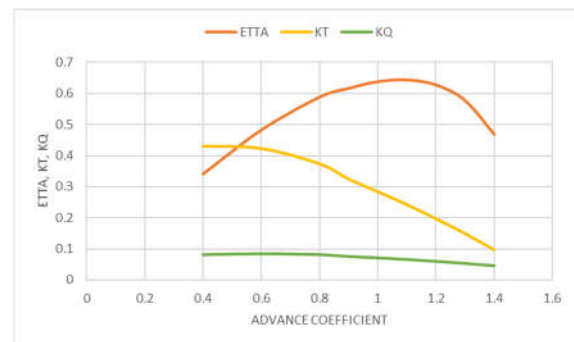
شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای راندمان برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای ضریب تراست برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف

#### ۴-۵ حالت پنجم $L=0.18DR$ :

در این حالت طول کورد برابر  $0.378$  متر در نظر گرفته شده و استاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر  $64/51$ ، حداکثر ضریب تراست  $0.4303$  و حداکثر ضریب گشتاور  $0.0836$  می‌باشد. مشابه حالات قبل نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده  $J=1.1$  روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد و حداکثر راندمان در بین تمامی حالات بررسی شده در این حالت وجود دارد. نمودار ضریب تراست و گشتاور روندی نزولی دارند. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۲ آمده است.



شکل ۱۲- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت  $L=0.18DR$

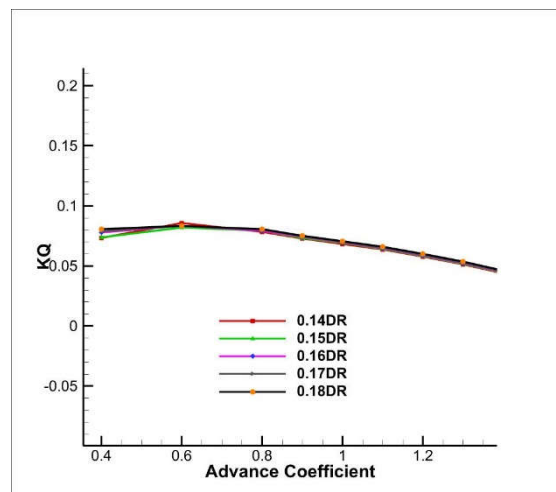
۴-۶ بحث در نتایج:

#### ۴-۶-۱ راندمان آب آزاد:

همان طور که از نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۳ مشخص است با افزایش طول کورد استاتور و هدایت بیشتر و صحیح خطوط جریان به لبه‌های حمله تیغه روتور (که با توجه به نحوه چیدمان تیغه‌های استاتور باعث افزایش زاویه حمله جریان به تیغه‌های روتور و به تبع آن افزایش ضریب لیفت تیغه‌های روتور می‌شود) راندمان آب آزاد پیشران افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود حالت  $L=0.18DR$  بیشینه راندمان حداکثر آب آزاد را دارد و در اغلب ضرایب پیشروی علی‌الخصوص در محدوده  $J=0.8$  تا  $J=1.3$  نیز راندمانی بیشتر از مابقی دارد. حالت  $L=0.15DR$  کمینه راندمان حداکثر را دارد، علیرغم اینکه در  $J=0.4$  بیشترین راندمان را دارد. حالت  $L=0.16DR$  هم در  $J=0.4$  و هم

### ۳-۶-۴ ضریب گشتاور:

با دقت در نمودار شکل ۱۵ در محدوده  $J=0.4$  تا  $J=0.6$  بین مقادیر ضرایب گشتاور حالات مختلف اختلاف‌های جزئی مشاهده و در همگی نوسان و تغییر روند وجود دارد که همانند نمودار ضریب تراست بیشترین نوسان مربوط به حالت  $L=0.14DR$  است و پس از آن نمودار حالات مختلف به تدریج به هم می‌پیوندند. در محدوده مذکور بیشترین کمترین ضریب گشتاور متعلق به حالت  $L=0.14DR$  است، یعنی در  $J=0.4$  کمترین ضریب گشتاور و در  $J=0.6$  بیشترین ضریب گشتاور را دارد.



شکل ۱۵- نمودار مقایسه‌ای ضریب گشتاور برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف

همانگونه که ملاحظه می‌شود هم در ضریب تراست و هم در ضریب گشتاور بیشترین نوسانات به علت تأثیر سرعت‌های القایی استاتور روی روتور در ضرایب پیشروی پایین رخ می‌دهد. از طرفی با افزایش طول کورد استاتور و هدایت صحیح جریان با زاویه حمله بالاتر به لبه حمله روتور نوسانات تقلیل یافته و ملاحظه می‌گردد که در حالت  $L=0.18DR$  این نوسانات مضر تقریباً حذف و روند یکنواخت گردیده است.

### ۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی:

بر اساس مطالبی که پیش‌تر عنوان گردید و بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده طول کورد استاتور بر عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشران پمپ‌جت تأثیر گذار است. در بین حالات بررسی‌شده در این پژوهش بیشینه حداکثر راندمان آب آزاد با مقدار  $64/51$  مربوط به حالت  $L=0.18DR$ ، کمینه حداکثر راندمان آب آزاد مربوط به حالت  $L=0.15DR$  با مقدار  $63/53$ ، بیشینه

ضریب تراست با مقدار  $4347/0$  مربوط به حالت  $L=0.14DR$  و کمینه ضریب گشتاور با مقدار  $441/0$  مجدداً مربوط به حالت  $L=0.14DR$  می‌باشد. از این رو به نظر می‌رسد در بین حالات بررسی‌شده مقدار  $L=0.18DR$  به دلیل داشتن بیشینه حداکثر راندمان آب آزاد (حدود ۱٪ بیشتر نسبت به کمترین مقدار) و محدوده بزرگ‌تر پوشش دهی ضریب پیشروی با راندمان بالاتر، یکنواخت بودن و تک‌روندی بودن ضریب تراست تولیدی و نمودار ضریب گشتاور متعارف نسبت به سایر حالات مورد بررسی برتری دارد.

### ۶-مراجع:

- [1] Gaggero S., "Design and analysis of pumpjet propulsors using CFD-based optimization", Ocean Engineering Volume 227, 1 October <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114304>
- [2] Sun D., "Tip vortex control effect and open-water performance of grooves in a pumpjet propulsor", Harbin Gongcheng Daxue, Volume 44 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816703006>
- [3] Ye J.M., "Hydrodynamic study of pumpjet propulsor with a ring at rotor tip and embedded in the groove of the inner wall of the duct", Chuan Bo Li Xue/Journal of Ship Mechanics, Volume 27 <https://doi.org/10.3390/jmse11101926>
- [4] Ku G., "Numerical investigation on cavitation and non-cavitation flow noise on pumpjet propulsion", Journal of the Acoustical Society of Korea, Volume 42 [doi:10.7776/ASK.2023.42.3.250](https://doi.org/10.7776/ASK.2023.42.3.250)
- [5] Ye J.m., "Tip flow control performance and mechanism of axial slots in a pumpjet propulsor", Ocean Engineering, Volume 226 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112950>
- [6] Jong-Woo Ahn, Han-Shin Seol, Hong-Seok Jung, Young-Ha Park: Study of the Open-Water Test and Analysis for a Pumpjet Propulsor in LCT. Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 59, No. 3, pp. 149-156, June 2022 <https://doi.org/10.3744/SNAK.2022.59.3.149>
- [7] Yunkai Zhou, Giorgio Pavesi, Jianping Yuan and Yanxia Fu, A Review on Hydrodynamic Performance and Design of

Pump-Jet: Advances, Challenges and Prospects, Journal of Marine Science and Technology, 10, 1514 (2022).

<https://doi.org/10.3390/jmse10101514>

[8] Yari E., Numerical Analysis of Hydrodynamic-Structural and Vibration of PumpJet Propulsion System of AUV, INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOGY, 16 (2021).

<http://ijmt.ir/article-1-765-en.html>

[۹] طراحی سیستم رانش پمپجت *CRP*، نوروز محمد نوری،

صابر محمدی، اولین همایش پیشرفته‌های دریایی

[۱۰] شبیه‌سازی عددی دنباله جریان پشت سیستم رانش

پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی

دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۱] استخراج منحنی عملکرد یک نمونه تحقیقاتی سیستم

پیش‌رانش پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری،

مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۲] مطالعه سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از

آن در شناورهای سرعت‌بالا، مهران مطلبی نژاد، حسن قاسمی،

چهارمین همایش ملی شناورهای تندرو

[13] Report of the propulsor Committee, (1992), "Workshop Organized by 20th ITTC Propulsor", 23 August, Seoul Korea.

[14] Roache, P. J.: Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual review of fluid Mechanics, 29, 123-160 (1997).

[15] Carlton, J. S., Marine propellers and propulsion, third ed., Amsterdam, Netherland, Elsevier (2012)

[16] Dawson, C.: The early history of water - jet propulsion. MARINERS MIRROR, 89, 88-92(2003)

[17] Bertram, V., Practical ship hydrodynamics Oxford, U.K, Butterworth Heinemann (2012)

[18] Suryanarayana, C., Rao, M. N., Raju, P. N., Balakrishan, T., and Lambada, S.: Torque Balance and Cavitation Studies on Underwater Vehicle Propulsion System. International Journal of Innovative Research and Development, 1, 62-73 (2012)