

# سیستم رانش دریایی پمپجت

احسان یاری<sup>۱</sup>، محمدحسین قائدشرف<sup>۲</sup>، وحید آئینی<sup>۳</sup>، هادی مهدوی تلامری<sup>۴</sup>

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

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

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

۴- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

## چکیده:

سیستم رانش پمپجت از انواع سیستم‌های پیشراننده دریایی می‌باشد که نیروی تراست را بر اساس روش اختلاف مومنتوم ایجاد می‌کند. پمپجت در درجه اول برای وسایل نقلیه زیر آبی طراحی شده است. سیستم رانش پمپجت به دلیل پنهان‌کاری و عملکرد عالی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما به دلیل محرمانه بودن و پیچیدگی آن، جزئیات کمی منتشر شده است. رفتار این سیستم پیشراننده تا حدود زیادی مشابه پمپ‌های جریان محوری می‌باشد. اجزای اصلی سیستم رانش پمپجت شامل داکت، روتور، استاتور، هاب و باس می‌باشند. روتور با تعداد تیغه‌های مشخص بر روی هاب نصب شده و استاتور نیز از سمت ریشه به هاب و از سمت نوک به سطحی داخلی داکت چسبیده است. پمپجت‌ها از نظر آرایش قرارگیری روتور و استاتور در داخل داکت و همچنین مکانیزم چرخش به چهار دسته طبقه‌بندی شده‌اند: پیش‌چرخش، پس‌چرخش، رینگ محرک و دوتایی ناهمسانگرد. نوع پیش‌چرخش، نویز و راندمان کمتری نسبت به نوع پس‌چرخش دارد و به نوعی از سیستم‌های پیشراننده فوق بی‌صدا محسوب می‌شود. با توجه به مزایای بیشمار استفاده از قوای محرکه هسته‌ای در زیردریایی‌ها و سایر وسایل نقلیه دریایی، پمپجت با توجه به مزایای آکوستیکی و همچنین محدودیت‌های پدیده مسمومیت با زنون و کاهش توان در راکتورهای هسته‌ای، کاندید مناسبی برای سیستم‌های پیشراننده دریایی با محرک هسته‌ای به نظر می‌رسد. در این پژوهش سعی بر این است که این نوع پیشراننده معرفی و مزایای آن بررسی شود.

## واژه‌های کلیدی:

پمپجت، سیستم‌های پیشراننده، روتور، استاتور، شناور

## Jet pump propulsion system

Ehsan Yari<sup>1</sup>, Mohammad Hossein QaedSharaf<sup>2</sup>, Vahid Aeeni<sup>3</sup>, Hadi Mahdavi Talarmi<sup>4</sup>

1- Ehsan Yari, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malek-e- Ashtar University of Technology, Isfahan

2- Mohammad Hussein Qaedsharaf, Ph.D. Student of Mechanical Engineering - Energy Conversion, Malek-e- Ashtar University of Technology, Isfahan

3- Vahid Aeeni, Senior Expert in Mechanical Engineering, Construction and Production, Technical and Vocational University, Tehran

4- Hadi Mahdavi Talaromi, Senior Expert in Aerospace Engineering, Malek-e- Ashtar University of Technology, Tehran

The pumpjet thrust system is one of the types of marine propulsion systems that creates the thrust force based on the momentum difference method. The pumpjet is primarily designed for underwater vehicles. The pumpjet propulsion system has been widely used due to its stealth and excellent performance, but due to its secrecy and complexity, few details have been published.

The behavior of this propulsion system is similar to axial flow pumps. The main components of jet pump thrust system include duct, rotor, stator, hub and boss. The rotor is installed on the hub with a specific number of blades and the stator is attached to the hub from the root side and to the inner surface of the duct from the tip side. pumpjet are classified into four categories based on the placement of the rotor and stator inside the duct as well as the rotation mechanism: pre-stator, post-stator, rim-driven and contra rotating. The pre-stator type has less noise and efficiency than the post-stator type and is considered as a type of ultra-silent propulsion system. Considering the numerous advantages of using nuclear propulsion in submarines and other marine vehicles, the pumpjet seems to be a suitable candidate for marine propulsion systems with nuclear propulsion, considering the acoustic advantages as well as the limitations of the phenomenon of xenon poisoning and power reduction in nuclear reactors. arrives. In this research, an attempt is made to introduce this type of engine and examine its advantages.

## Keywords

pumpjet, propulsion systems, rotor, stator, float

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر تقاضا برای شناورهای با سرعت بالا در بخش‌های نظامی و تجاری دارای روند رو به رشدی بوده‌است. این موضوع سبب طراحی پیش برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده گردیده‌است که دارای راندمان بالاتر، ارتعاشات و نویز کمتر و قابلیت عملکرد مطمئن‌تر هستند. سیستم‌های رانش پادار، پروانه‌های نازل‌دار و سیستم‌های داکت دار نمونه‌هایی از طرح‌های موفق در این زمینه هستند. انتخاب سیستم رانش مناسب از اولویت‌های مهم فرآیند طراحی شناورها و زیرسطحی‌ها می‌باشد. سال‌ها پیش، این تفکر که می‌توان با استفاده از پمپ و ایجاد مومنتوم نیروی رانش تولید کرد؛ باعث شد اولین سیستم جت آب ساخته شود. با ورود پمپ‌های با تکنولوژی بالاتر و راندمان بهتر این سیستم توانست به‌عنوان رقیب جدی -البته در محدوده‌های خاص- برای سایر سیستم‌ها مطرح شود.

## ۲- سابقه تحقیقات و مطالعات انجام‌گرفته

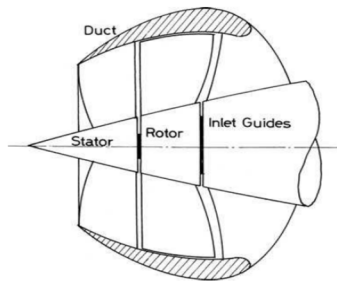
در سطح بین‌المللی دنگوی کین و همکاران [۱] در اکتبر ۲۰۲۱ تأثیر داکت و استاتور پیش‌چرخش را بر روی خصوصیات ناحیه دنباله پمپ‌جت بررسی نمودند. مجدداً وی و همکارانش [۲] در مارس ۲۰۲۱ عملکرد هیدرودینامیکی و ورטיسته دنباله دو نوع جت پمپ معمولی را مقایسه نمودند. شیاهویلو و همکاران [۳] در ژانویه ۲۰۲۱ پژوهشی در مورد انتشار نویز جت پمپ‌های فشارقوی در زیرآب انجام دادند. لین لو و همکاران [۴] در اوت ۲۰۲۰ به‌صورت عددی خصوصیات جریان یک جت پمپ را با جریان زاویه‌دار بررسی نمودند. چنگ‌چنگ کیو و همکاران [۵] در جون ۲۰۲۰ شبیه‌سازی عددی عملکرد هیدرودینامیکی و کاویتاسیون پیش‌رانه جت پمپ در فواصل مختلف نوک پره تا داکت را در جریان زاویه‌دار انجام دادند. هان لی و همکاران [۶] در می ۲۰۲۰ پژوهشی جهت تخمین گذرش جریان یک نوع جت پمپ دارای استاتور پیش‌چرخش و مقایسه بین مدل‌های RANS/LES بر ورטיسته ناحیه دنباله انجام دادند. دنگوی کین و همکاران [۷] در سپتامبر ۲۰۱۹ فناوری کاهش نویز در زیرآب با استفاده از داکت دندان‌اره‌ای را

برای جت پمپ معرفی نمودند. هان لی و همکاران [۸] در نوامبر ۲۰۱۹ تحلیل گذرش جریان سیال بر روی یک پیشران جت پمپ انجام دادند. لین لو و همکاران [۹] در می ۲۰۱۸ بررسی عددی ویژگی‌های جریان فاصله خالی نوک پره تا داکت پیشران جت پمپ را انجام دادند. جی گونگ و همکاران [۱۰] در اکتبر ۲۰۱۷ توزیع سرعت را در ورودی داکت پیشران جت پمپ یک مدل کشتی خودران به روش PIV اندازه‌گیری کردند. در ایران، احسان یاری و همکاران [۱۱] در ۱۴۰۰ رفتار هیدرودینامیکی و پارامترهای سیالاتی میدان جریان حول سیستم رانش پمپ‌جت را به‌صورت عددی بررسی نمودند. نوروزمحمد نوری و همکاران [۱۲] در ۱۳۹۵ مزایا، معایب، چالش‌های طراحی و الگوریتم شبیه‌سازی عددی پمپ‌جت CRP را بررسی و الگوریتمی برای طراحی ارائه نمودند. امین طالع زاده شیرازی و همکاران [۱۳] در ۱۳۹۵ شبیه‌سازی عددی دنباله جریان در ناحیه و یک پشت بدنه و سیستم رانش را با نرم‌افزار تجاری موجود و مدل متداول توربولانسی دو معادله‌ای انجام دادند. مجدداً همین نویسندگان و همکاران [۱۴] در ۱۳۹۵ یک منحنی عملکرد از نمونه تحقیقاتی طراحی‌شده سیستم رانش پمپ‌جت به کمک شبیه‌سازی عددی استخراج نمودند. مهران مطلبی نژاد و همکاران [۱۵] در ۱۳۹۴ سیستم رانش پمپ‌جت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت‌بالا را مورد مطالعه قرار دادند.

## ۳- انواع سیستم پیشران دریایی

تاکنون برای شناورها سیستم‌های رانش متعددی پیش‌بینی‌شده که هر یک در دوران خاصی بکار گرفته‌شده و پس از مدتی کنار گذاشته‌شده‌اند. رایج‌ترین نوع سیستم رانش همان پروانه می‌باشد که امروز نیز به‌صورت تکامل‌یافته‌ای استفاده می‌شود. ملاک‌های زیر در طراحی و استفاده از سیستم‌های مختلف رانش پروانه‌ای در نظر گرفته می‌شود:

- (۱) بازدهی بالاتر
- (۲) سهولت در ساخت و تعمیر و نگهداری
- (۳) امکان جانمایی در داخل شناور
- (۴) ایجاد حداقل ارتعاش و سروصدا



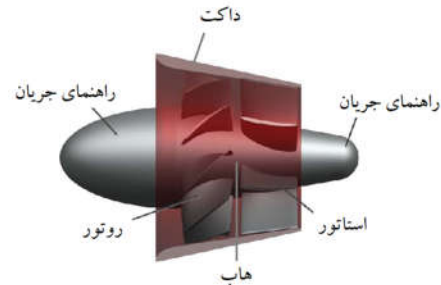
شکل ۲: آرایش ایده آل یک پمپجت [۱۶]

از شکل مشاهده می‌شود که سیستم پایه شامل یک مجرای ورودی است که به راحت‌ترین روش برای کشتی مربوطه به بدنه وارد می‌شود. از این مجرای ورودی آب سپس از روتور عبور می‌کند که ممکن است اشکال مختلفی داشته باشد. معمولاً این قسمت یک توربوماشین جریان مختلط یا محوری است که شامل تعدادی تیغه از ۴ تا ۸ عدد است. مرحله بعدی عبور آب معمولاً عبور از یک حلقه استاتور است که وظیفه دوگانه صاف کردن جریان و همچنین به‌عنوان تکیه‌گاه بدنه هاب را دارد. حلقه استاتور احتمالاً از ۷ تا ۱۳ تیغه تشکیل شده است، اما باید توجه داشت که در همه طرح‌ها این‌گونه نیست. در برخی از طرح‌ها، نازل قابل هدایت است و در برخی دیگر از صفحات منحرف‌کننده برای کنترل جهت جریان و در نتیجه اعمال نیروهای فرمان به کشتی از طریق تغییر جهت حرکت جت آب خواهد بود.

#### ۱-۴ مزایای استفاده از پمپجت:

- ۱) امکان رسیدن به سرعت‌های بالا پیش از شروع کایتاسیون که ناشی از افزایش فشار استاتیک داخلی است
- ۲) چگالی بالای توان با توجه به حجم پیش برنده و محرک اصلی
- ۳) عدم وجود زائده‌های ایجادکننده نیروی درگ در جهت حرکت
- ۴) سروصدا و ارتعاش کم
- ۵) از بین رفتن خطر اضافه‌بار موتور
- ۶) تولید قدرت و سرعت مطلوب
- ۷) قابلیت کوپل شدن هرگونه موتور محرک بر روی این سیستم رانشی
- ۸) محافظت از هرگونه شکستگی و ضربه ایمپلر

سیستم‌های رانش پروانه‌ای انواع مختلف دارند که در بین آن‌ها می‌توان به پروانه‌های گام ثابت، پروانه‌های داکت دار، پروانه‌های غلاف دار و پروانه‌های معکوس گرد اشاره کرد.



شکل ۱: سیستم رانش پمپجت و اجزای مربوطه

#### ۴- سیستم‌های پیشران داکت‌دار

مفهوم قوای محرکه پمپجت و واترجت به سال ۱۶۶۱ برمی‌گردد که توگود و هیز برای اولین بار این شکل از پیشرانه را پیشنهاد کردند. استفاده از آن در سال‌های گذشته عمدتاً محدود به کشتی‌های تفریحی با سرعت بالا و قایق‌های کاری بوده‌است که در آن مانور پذیری بالا موردنیاز است. تنها در سال‌های اخیر است که پمپجت برای کشتی‌های پرسرعت بزرگ موردتوجه قرار گرفته است و در نتیجه اندازه پیشران‌ها در چند سال اخیر به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. دلیل استفاده کمتر از پیشران پمپجت در مقایسه با پیشران پروانه پیچی این بود که آن‌ها عموماً پیشرانی ساده‌تر، سبک‌تر و کارآمدتر در نظر گرفته می‌شدند؛ باین‌حال، معرفی پمپ-جت‌های کارآمدتر و تقاضای تجاری برای کشتی‌های با سرعت بالاتر، دلایل اصلی رشد سریع آن‌ها است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده‌است پمپجت دارای سه جزء اصلی است: یک داکت، یک مجموعه پمپ (شامل روتور و استاتور و هاب).

۹) امکان استفاده برای طیف وسیعی از شناورها و زیرسطحی‌ها

۱۰) کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون

#### ۲-۴ معایب سیستم پمپ‌جت:

- ۱) راندمان پایین در سرعت‌هایی کم
- ۲) تجهیزات نسبتاً زیاد سیستم که باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌گردد

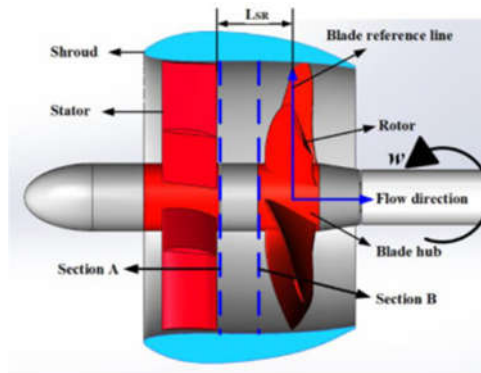
#### ۵- انواع سیستم پیشران پمپ‌جت:

سیستم پیشران پمپ‌جت را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف از قبیل نحوه آرایش قرارگیری روتور و استاتور نسبت به هم و ... به ۴ دسته تقسیم نمود که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

#### ۱-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت پیش چرخش:

در این نوع پمپ‌جت در قسمت ورودی داکت، استاتور قرار دارد و پس از آن بر روی هاب سیستم پیشران، روتور قرار گرفته‌است و به عبارتی استاتور قبل از روتور در راستای حرکت جریان قرار دارد.

در این حالت تعادل گشتاور تنها در یک نقطه عملکرد پمپ‌جت اتفاق می‌افتد. این نوع پمپ‌جت نسبت به سایر انواع سیستم‌های پمپ‌جت دارای نویز کمتری بوده و عملاً جزو سیستم‌های پیشران فوق بی‌صدا محسوب می‌شود.

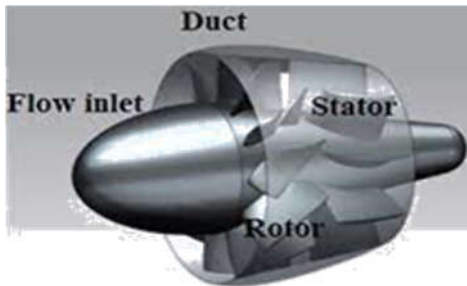


(a) Computational model

شکل ۳: شمای پمپ‌جت پیش چرخش

#### ۲-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت پس چرخش:

در این نوع سیستم پیشران پمپ‌جت، استاتور پشت روتور قرار گرفته‌است و همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود استاتور نزدیک به قسمت خروجی داکت قرار دارد. در این نوع پمپ‌جت نیز تعادل گشتاور تنها در یک نقطه عملکردی پمپ‌جت اتفاق می‌افتد. این نوع از پمپ‌جت نسبت به سیستم پیش چرخش دارای راندمان بالاتری می‌باشد.



شکل ۴: شمای پمپ‌جت پس چرخش

#### ۳-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت بدون شفت یا رینگ محرک:

یکی دیگر از انواع جت پمپ که دارای یک رینگ بوده و یک موتور الکتریکی حلقه‌ای در داخل پوشش جت پمپ وجود دارد که روتور پره را در داخل حفره جت پمپ می‌چرخاند تا نیروی رانش ایجاد کند. بزرگ‌ترین مزیت آن حداقل انتشار نویز و نیاز به فضای کم است. از آنجایی که وتور مستقیماً توسط نیروهای الکترومغناطیسی هدایت می‌شود، به هیچ شفت و جعبه‌دنده‌ای نیاز نیست. آب‌بندی قطعات متحرک ضروری نیست و موتور و استاتور را می‌توان به صورت هرمتیک آب‌بندی کرد. از آنجایی که تیغه‌ها روی حلقه روتور نصب شده‌اند، هیچ فاصله خالی بین نوک پره و بدنه پمپ وجود ندارد. عدم وجود این فضای خالی به همراه عدم وجود صدای گیربکس، منابع برجسته نویز را حذف می‌کند. عیب این نوع جت پمپ کاهش راندمان به دلیل افزایش تلفات اصطکاکی در شکاف بین روتور و استاتور است.

$V_1$  داده می‌شود، از آنجایی که نیرو برابر با نرخ تغییر مومنتوم است، تراست تولیدشده توسط سیستم پیشرانش بدین صورت است:

$$T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1) \quad (2)$$

و توان پیشران  $P_T$  بدین صورت خواهد بود:

$$P_T = TV_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1) \quad (3)$$

که  $V_S$  سرعت شناور است. اکنون برای به دست آوردن یک رابطه مفید برای توان مورد نیاز برای به حرکت درآوردن سیستم پیشران، لازم است به معادله انرژی عمومی مکانیک سیالات متوسل شویم و این را بین ورودی و خروجی پیشران اعمال کنیم. از این رو می‌توانیم برای سیستم بنویسیم:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H_P = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h + h_{loss} \quad (4)$$

که در آن  $H_P$  هد مرتبط با انرژی تأمین شده به سیستم (یعنی هد پمپ) است  $\Delta h$  اختلاف هد استاتیک بین ورودی و خروجی پمپجت است.

یعنی  $h_{loss}$  ( $\Delta h = h_1 + h_2$ ) تلفات مربوط به جریان از طریق سیستم و همچنین تلفات پمپ است.

در مورد تفاوت هد استاتیک بین ورودی و خروجی سیستم باید توجه داشت که این پارامتر در شرایط راه‌اندازی و دریاپیمایی متفاوت خواهد بود. با توجه به ترم تلفات،  $h_{loss}$  با تلفات اصطکاکی و ریزش گردابی مرتبط است که در اطراف خم‌های درون داکت، در مسیر توری‌های ورودی و موانع مختلف درون سیستم که ممکن است جریان را در طول عبور از واحد مختل کند، ایجاد می‌شود.

اکنون به معادله قبل برمی‌گردیم و برای اهداف عملی با فرض ثابت بودن  $p_2$  بالای خط تراز آب معادله را می‌توان بدین صورت بازنویسی کرد:

$$H_P = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_2 + h_{loss} \quad (5)$$

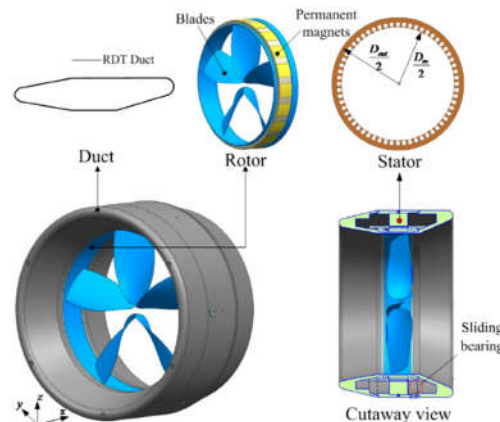
که

$$p_1 = p_2 + h_1 \rho g \quad (6)$$

توان انتقال یافته به آب توسط پمپ را می‌توان برحسب انرژی در واحد زمان به صورت  $\dot{m} g H_P$  بیان کرد.

که از رابطه بالا منجر به این رابطه خواهد شد:

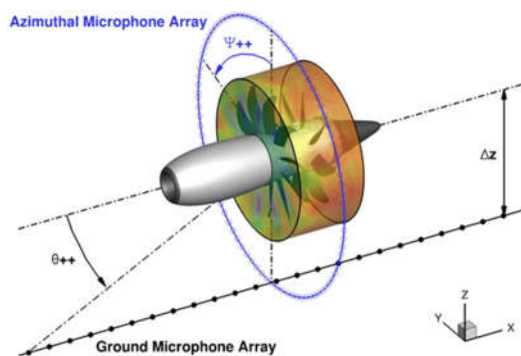
$$P_{pump} = \dot{m} \left[ \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss}) \right] \quad (7)$$



شکل ۵: شمای پمپجت بدون شفت یا رینگ محرک

#### ۴-۵ سیستم پیشران پمپجت دوتایی ناهمسانگرد:

یک نوع پمپجت که شامل ۲ تور است؛ در جهات مختلف دوران می‌کنند و گشتاور یکدیگر را خنثی می‌نمایند. این نوع می‌تواند در نقاط عملکردی بسیاری گشتاور عکس‌عملی وارد شونده به بدنه را خنثی نماید، زیرا به ازای هر سرعت دورانی پروانه عقب یا جلو می‌توان سرعت دورانی پروانه دیگر را به نحوی تنظیم نمود که گشتاور عکس‌عملی را خنثی نماید.



شکل ۶: شمای پمپجت دوتایی ناهمسانگرد

#### ۶- اصول اساسی پیشرانش:

فرض کنید آب با سرعت  $V_1$  وارد سیستم شده و به وسیله نازلی به مساحت  $A_2$  با سرعت  $V_2$  از آن خارج می‌شود. دبی جرمی آب از طریق جت آب با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = \rho A_2 V_2 \quad (1)$$

که  $\rho$  چگالی آب است. از این رو، افزایش نرخ تغییر مومنتوم آب عبوری از پمپجت توسط  $\rho A_2 V_2 (V_2 -$

$$h_D = k_D \frac{(v_s + \Delta v)^2}{2g} \quad (13)$$

که در آن  $(\Delta V = V_2 + V_1)$ . ون والری پیشنهاده می‌دهد که مقدار  $k_D$  در محدوده  $0.04 < k_D < 0.10$  انتخاب شود.

ترم افت هد پمپ  $h_P$  در معادله افت هد کل به پیکربندی پمپ و تلفات مربوط به آن مرتبط است. این تلفات هد را می‌توان برحسب هد پمپ  $H$  و بازده پمپ  $\eta_P$  بیان کرد:

$$h_P = H \left( \frac{1 - \eta_P}{\eta_P} \right) \quad (14)$$

و برای پمپ جریان محوری یا مختلط مدرن با طراحی خوب، مقدار  $\eta_P$  باید حدود  $0.90$  باشد.

بر اساس قیاس با ملخ‌ها، راندمان پمپ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta_P = \frac{\phi \psi}{2\pi K_Q} \quad (15)$$

که در آن  $\phi$  و  $\psi$  ضرایب انتقال انرژی جریان بدین صورت تعریف شده‌اند:

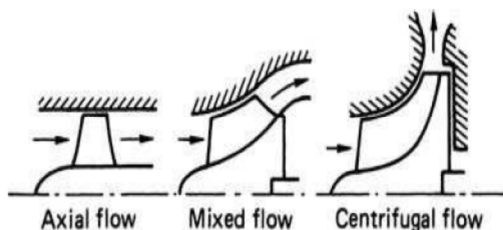
$$\psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (16)$$

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (17)$$

و  $K_Q$  ضریب گشتاور نرمال پروانه است.

#### ۷- انواع پروانه روتور:

هنگام طراحی یک جت برای انجام یک وظیفه معین، یکی از اولین مشکلاتی که طراح با آن مواجه می‌شود تولید مناسب‌ترین نوع پمپ برای کار موردنظر است. انتخاب پمپ‌ها بین جریان گریز از مرکز، جریان مختلط، جریان محوری یا القایی خواهد بود. شکل ۷ سه نوع اول توربوماشین را دسته‌بندی می‌کند درحالی‌که شکل ۸ نوع القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: انواع پروانه [۱۶]

بنابراین راندمان حالت آب آزاد یک واحد جت را می‌توان به کمک معادلات بالا به صورت نسبت توان پیشرانش به توان تحویلی پمپ به شرح زیر به دست آورد:

$$\eta_0 = \frac{V_S(V_2 - V_1)}{\frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss})} \quad (8)$$

ترم اتلاف  $h_{loss}$  در معادله بالا مجموع دو اتلاف مستقل است. آن‌هایی که به عنوان افت هد داخلی  $h_D$  تعریف می‌شوند و آن‌هایی که مربوط به افت هد پمپ  $h_P$  هستند. بنابراین  $h_{loss}$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$h_{loss} = h_D + h_P \quad (9)$$

البته تلفات داخلی در درجه اول به پیکربندی پمپ جت بستگی دارد و شامل تلفات ورودی  $h_{DI}$ ، تلفات دیفیوزر  $h_{DD}$  و تلفات اصطکاک پوسته‌ای  $h_{DSF}$  است. بنابراین:

$$h_D = h_{DI} + h_{DD} + h_{DSF} \quad (10)$$

تلفات ورودی به خودی خود مجموع تلفات ناشی از محافظ ورودی، پره‌های راهنما و خم‌های مختلف است. همه این تلفات اساساً تابعی از سرعت ورودی  $V_1$  هستند و در نتیجه می‌توان آن‌ها را به شکل زیر بیان کرد:

$$h_{DI} = k \frac{v_1^2}{2g} \quad (11)$$

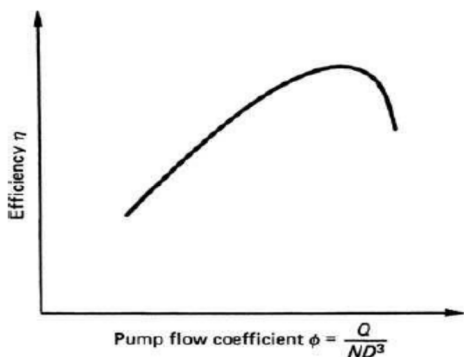
ضریب  $k$ ، مجموع دو عامل دیگر  $k_1$  و  $k_2$  است که نشان‌دهنده تلفات محافظ ورودی و پره‌های هدایت‌کننده و تلفات ناشی از خمیدگی‌ها به ترتیب هستند. مقادیر معمول برای  $k_1$  و  $k_2$  به ترتیب  $0.10$  و  $0.15$  است.

تلفات هد دیفیوزر را می‌توان از روش‌های هیدرولیکی معمولی تخمین زد، که از آن عبارت  $h_{DD}$  را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$h_{DD} = (1 - \eta_D)(1 - \epsilon^2) \frac{v_1^2}{2g} \quad (12)$$

که در آن  $\eta_D$  بازده دیفیوزر مرتبه  $90$  درصد در شرایط عادی و  $\epsilon$  نسبت ورودی و خروجی دیفیوزر است. عبارت نهایی در معادله افت هد داخلی،  $h_{DSF}$  است که تلفات اصطکاک پوسته‌ای را تعریف می‌کند و می‌توان از محاسبه سطوح خیس شده ورودی، داکت، دیفیوزرها، پایه‌های نگه‌دارنده و پره‌ها و نازل در ارتباط با ضرایب اصطکاک مربوطه تخمین زده شود. اگر مجموع تلفات داخلی  $h_D$  همان‌طور که در رابطه افت هد داخلی تعریف شده است، برحسب یک ضریب تلفات منفرد به صورت زیر نمایش داده شود:

در نتیجه، شرط حداکثر بازدهی جایگزین شرط تشابه هندسی می‌شود. علاوه بر این، هر یک از انواع مختلف توربوماشین نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ بازدهی بهینه خود را در یک باند نسبتاً باریک از سرعت خاص خواهند داشت. به‌طور کلی اندازه پروانه، برای یک وظیفه معین توسط جریان و هد مورد نیاز تعریف می‌شود و با سرعت ویژه تغییر می‌کند. بنابراین هر چه سرعت ویژه بالاتر باشد احتمال بیشتری وجود دارد که یک ماشین جریان محوری انتخاب شود که از نظر فیزیکی کوچک‌تر از همتای گریز از مرکز خود باشد. در نتیجه، از آنجایی که سرعت ویژه بالا مستلزم یک ماشین کوچک‌تر است، مطلوب است که بالاترین سرعت خاص، مطابق با راندمان خوب، برای یک کاربرد خاص انتخاب شود.



شکل ۹: نمودار مشخصه راندمان یک نمونه پمپ [۱۶]

از ویژگی‌های پمپ‌های گریز از مرکز جریان کم و فشار بالا است؛ در حالی که برای توربوماشین‌های جریان محوری عکس این مطلب صادق است. جدول ۱ محدوده‌های کلی را نشان می‌دهد که انواع مختلف پمپ مناسب برای طراحی پمپ انتظار می‌رود در آن کار کنند. در حالی که نوع گریز از مرکز و پمپ‌های جریان محوری انواع اصلی توربوماشین‌هایی بودند که برای جت‌های آب استفاده می‌شوند. نوع جریان مختلط، که مشتقی از نوع گریز از مرکز است به سرعت خود را تثبیت نموده است. این امر به این دلیل بود که نوع مختلط قطر کمتری نسبت به پمپ گریز از مرکز داشته و هد پمپ راحت‌تر به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. ماشین‌های نشان داده شده در شکل ۸ به خوبی شناخته شده‌اند و پیش‌زمینه نظری آن‌ها به خوبی در کتاب‌های مرجع آمده است. نوع القایی، شکل ۹، در ابتدا در پاسخ به نیاز به پمپ‌های سوخت مایع بزرگ برای پیشران موشک ساخته شد. از شکل مشاهده می‌شود که نوع القایی شامل چهارپره کامل در مرحله اولیه و چهارپره



شکل ۸: نوع القایی [۱۶]

برای یک توربوماشین هیدرولیک معین، با فرض اینکه هر دو اثر رینولدز و کاویتاسیون ناچیز هستند، یک رابطه منحصر به فرد بین بازدهی سیستم و ضریب جریان وجود دارد که مشابه منحنی‌های بازدهی پروانه است. برای یک واحد پمپ، منحنی راندمان در مقابل ضریب جریان مشابه شکل ۹ خواهد بود. علاوه بر این، سایر ضرایب عملکردی را می‌توان از تحلیل ابعادی تعیین کرد و در این زمینه ضریب انتقال انرژی  $\psi$  از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب جریان، راندمان تمایل به افزایش دارد و سپس به حداکثر مقدار می‌رسد که پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. نقطه بازدهی بهینه را می‌توان برای شناسایی یک مقدار منحصر به فرد ضریب جریان استفاده کرد.

علاوه بر این مقدار متناظر  $\psi$  را می‌توان به‌طور منحصر به فرد تعیین کرد. در فناوری پمپ، معمول است که سرعت ویژه  $N_s$  ماشین تعریف شود.

از مقادیر  $\phi$  و  $\psi$  که مربوط به نقطه حداکثر راندمان است:

$$N_s = \frac{\phi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \quad (18)$$

که کاهش می‌یابد به

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad (19)$$

یا بیشتر به شکل ابعادی آن:

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (20)$$

به دلیل وابستگی سرعت ویژه به نقطه حداکثر بازدهی در منحنی مشخصه پمپ، این پارامتر در انتخاب نوع توربوماشین مورد نیاز برای کار داده شده از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. برای تغییر نقطه حداکثر بازده نسبت به ضریب جریان، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است؛ نیاز است که هندسه پمپ تغییر کند؛

کوچک دیگر است که اجازه می‌دهد مرحله مکش تا حدی کوتاه شود. به عبارت دیگر این تیغه‌های بزرگ با یک ردیف تیغه‌های کوتاه دنبال می‌شوند که حدود ۶۰ درصد افزایش هد درون توربوماشین را فراهم می‌کنند.

جدول ۱: محدوده سرعت ویژه انواع مختلف پمپ [۱۶]

Pump type	Approximate $N_s$ (rad)
Centrifugal pump	Below 1.2
Mixed flow pump	1.2-3.0
Axial flow pump	3.0-7.0
Inducers	Above 7.0

## ۸- طراحی اجزای جت :

عناوین در مورد طراحی و تجزیه و تحلیل سیستم پیشران جت گسترده است. این بخش به جنبه‌های طراحی عملی اجزای مختلف می‌پردازد. از لحاظ رهیافت کلی طراحی برای مسئله، پارامتر اساسی نسبت سرعت ورودی،  $IVR$  است. این پارامتر به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود که در آن  $V_1$  سرعت ورودی آب و  $V_s$  سرعت وسیله دریایی است:

$$IVR = \frac{v_1}{v_s} \quad (21)$$

این پارامتر در واقع دبی جریان جت را همراه با نسبت سرعت، هد پمپ و راندمان کلی و علاوه بر این شروع کاویتاسیون در لبه ورودی را کنترل می‌کند. روش اصلی طراحی این است که محدوده‌ای از مقادیر  $IVR$  را در سرعت طراحی وسیله دریایی در نظر بگیریم که از آن می‌توان طراحی پمپ، توان تحویلی و راندمان را محاسبه کرد. سپس برای هر یک از این طرح‌های پمپ می‌توان عملکرد خارج از طراحی را در نظر گرفت و دوباره پارامترهای توان‌های تحویلی، راندمان و شرایط کاویتاسیون را محاسبه نمود. از نتایج ماتریس حاصله جدول ۲ طرح می‌تواند مناسب‌ترین ترکیب نتایج را متناسب با شرایط وسیله دریایی، عمدتاً سرعت کروز و سرعت هاب انتخاب کند.

جدول ۲: ماتریس طراحی [۱۶]

<i>IVR design/condition</i>	1	2	3	4	5
Off-design condition 1	*	*	*	*	*
Off-design condition 2	*	*	*	*	*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Off-design condition <i>N</i>	*	*	*	*	*

## ۹- طراحی داکت:

پروفیل داکت باید به گونه‌ای طراحی شود که مکش یکنواخت آب را در محدوده عملکرد کشتی فراهم کند و بنابراین از جدایش قابل توجه جریان یا کاویتاسیون در ورودی داکت جلوگیری شود. در برخی کاربردهای جت، معمولاً در کاربردهای هیدرو فویل که جریان آب باید از پایه‌های فویل عبور کند، لازم است که پره‌های راهنما به داخل تونل وارد شوند تا به جریان آب در اطراف خم‌های تونل کمک کنند، استحکام این پره‌های راهنما نیاز به توجه دقیق دارد و اگر آن‌ها به عنوان مثال، یک جزء جدایی‌ناپذیر از خم را تشکیل می‌دهند، باید ریشه آن‌ها به میزان کافی fillet بخورد. همچنین لازم است که این پره‌های هادی با جریان هم‌راستا شوند و لبه‌های پره‌ها باید صاف باشد تا باعث جدایش یا ایجاد کاویتاسیون نشود. پره‌های نصب‌شده باید برای شکست یا عیوب تهدیدکننده در طول سرویس بازبینی شوند که می‌تواند مستقیماً با بازرسی بصری یا غیرمستقیم از طریق استفاده از بوریوسکوپ در داخل باشد.

## ۱۰- طراحی ایمپلر :

طرح هیدرودینامیکی پروانه پمپ از مشی کلی جدول ۲ پیروی می‌کند، مشخصات دقیق و شکل پروانه به صورتی آتی تعریف می‌شود. محاسبه دقیق اجزای پروانه از نظر استحکام و یکپارچگی آن‌ها باید بر اساس حداکثر توان نامی ماشین باشد. بنابراین، بارهای متوسط روی تیغه باید بر این اساس برآورد شود، و از آنجا می‌توان تحلیل تنش اجزای مختلف را انجام داد. یک روش برای برآیند استفاده از تطبیق روش تیر یک سر گیردار است. باین‌حال، باید به خاطر داشت که تیغه‌های پروانه، بخصوص برای پمپ‌های جریان مختلط، پمپ‌های محوری



و القاکننده‌ها، به‌طورکلی نسبت ابعاد پایینی دارند، و بنابراین تجزیه و تحلیل تیرهای یک‌سر گیردار در مقابله با این وضعیت مشکلی ذاتی دارد. بنابراین باید در تحلیل خستگی نهایی تیغه‌ها و در تعیین ضریب اطمینان، برای این مورد توجه لازم صورت گیرد، با این حال، با انجام محاسبات المان محدود بر روی کلاس‌های خاصی از تیغه‌ها می‌توان میزان خطا در نتایج تیر یک سر گیردار را به دست آورد. لذا با توجه به سهولت نسبی محاسبات اجزای محدود، این روش رضایت‌بخش‌تری برای محاسبه توزیع تنش در تیغه‌ها و هاب است و در صورت امکان باید از آن استفاده کرد.

کدهای RANS دینامیک سیالات محاسباتی قادر به تخمین میدان سرعت جریان در مسیر پروانه هستند، با این حال، در غیاب داده‌های میدان ویک، برآورد واقعی تنش‌های نوسانی در عمل دشوار است. با این وجود یک تخمین واقع‌بینانه مورد نیاز است و باید بر اساس در نظر گرفتن موانع بالادست و تأثیر آن‌ها بر جریان به پروانه باشد. پس از تکمیل این تخمین، می‌توان آن را در ارتباط با تنش متوسط و برآورد تنش پسماند برای ارزیابی خستگی طرح با استفاده از روش‌های سودربرگ یا اصلاح‌شده گودمن استفاده کرد.

تیغه‌های پروانه باید دارای فیلتهای کافی در ریشه باشد. چنین فیلتهایی باید با دقت طراحی شوند تا درجه کاهش تنش مورد نیاز را فراهم کنند. در این خصوص، طرح فیلت بیضوی یا مرکب ترجیح داده می‌شود. اگرچه فیلت با یک شعاع کفایت می‌کند؛ مشروط بر اینکه شعاع آن بزرگ‌تر از ضخامت تیغه باشد؛ اما به اندازه طرح مرکب مؤثر نخواهد بود. در برخی طراحی‌ها تیغه‌ها روی هاب پمپ پیچ می‌شوند؛ آنگاه توجه زیادی به جزییات آرایش پیچ و تنش‌های حاصله در صفحه و بدنه هاب مورد نیاز است، چون محل این اتصالات یک منبع بالقوه خرابی است. طراحی مقطع تیغه پروانه نیز توجه بالایی را می‌طلبد. پروانه‌های پمپ در مقایسه با اکثر پروانه‌ها با سرعت چرخشی بالاتر کار می‌کنند. در نتیجه، درحالی‌که طراحی کلی آن‌ها مبتنی بر کاویتاسیون قابل قبول و کنترل اثرات مضر آن است. عدم توجه به جزییات می‌تواند این مفهوم کلی را به‌طور کامل از بین ببرد. در نتیجه در همه پمپ‌ها به‌جز سانتریفیوژ، تیغه‌ها به فرم‌های آبروفویل برای کمک به کنترل خواص

کاویتاسیون پمپ نیاز است. با توجه به هد مورد نیاز برای توسعه پمپ، تیغه می‌تواند از نوع کمبردار یا بدون کمبر باشد. علاوه بر این، باید کنترل کافی بر روی ساخت تیغه اعمال شود تا اطمینان حاصل شود که دقت ساخت پروفیل‌های تیغه برای عملکرد کاویتاسیون مناسب آن‌ها کافی است. به علت خواص هیدرودینامیکی، بایستی فضای خالی تیغه‌ها در حداقل مقدار در نظر گرفته شود تا از تلفات بی‌مورد نیز جلوگیری شود. با این حال، این مقدار باید با مقدار فاصله کافی برای پاسخگویی به هرگونه رفتار ارتعاشی گذرای مکانیسم چرخشی، حرکت محوری شفت یا انبساط حرارتی قسمت‌های مختلف سیستم انتقال قدرت تصحیح شود. به‌منظور محافظت در برابر شکست تیغه توسط ارتعاش، فرکانس طبیعی تیغه باید با ابزار مناسب محاسبه شود. سپس نتایج این محاسبه باید در خارج از محدوده عملیاتی اولیه واحد پمپ تطبیق داده شود. در انجام این محاسبه، به‌جای محاسبه صرفاً بر اساس قرار گرفتن تیغه‌ها در هوا، باید برای تأثیرات آب بر پره‌ها مقدار مناسبی در نظر گرفته شود. از آنجایی‌که پروانه‌های پمپ با سرعت بالا کار می‌کنند به‌وضوح نیاز به بالانس آن‌ها وجود دارد. در بسیاری از موارد، که قسمت دوار کوچک است؛ کافی است عملیات بالانس را به یک روش استاتیکی که به یک استاندارد مناسب (به‌طور معمول استاندارد ISO) محدود کنیم. با این حال، اگر احساس شود که قسمت چرخان به میزان زیادی «خارج از بالانس» است بخصوص از نظر سیستم شفتینگ، آنگاه باید بالانس دینامیکی اجرا شود. به دلیل ماهیت پروانه پمپ و حساسیت ذاتی آن به آسیب، نیاز است تمهیداتی برای بازرسی این قطعه در حین سرویس، ترجیحاً بدون دمونتاژ کردن کل واحد اندیشیده شود. در مورد پروانه، به‌وضوح ترجیح داده می‌شود که بازرسی بصری باشد، با این حال، اگر این به هر دلیلی مقدور نبود، بازرسی با بوروسکوپ کافی خواهد بود، اما به‌اندازه قابلیت بازرسی بصری مستقیم رضایت‌بخش نخواهد بود.

#### ۱۱- طراحی تیغه استاتور:

همه واحدهای جت با تیغه استاتور طراحی نشده‌اند. با این وجود، در طرحی که استاتور وجود دارد طراحی باید هم شرایط حداکثر تولید توان مداوم و هم مانورهای توقف

را در نظر بگیرد؛ زیرا استاتور فشار وارد به خود را به مجموعه پیشران وارد می‌کنند. اثرات مانورهای فرمان عموماً شرایط سخت‌تری نسبت به مانورهای توقف ایجاد می‌کند.

همان مواردی که در مورد تیغه پروانه در مورد شکل مقطع، بارگذاری و استحکام تیغه مطرح شد؛ به‌طور متشابه برای استاتور اعمال می‌شود. اما در مورد تیغه‌های استاتور، یک فیلت ریشه باید در هر دو انتهای تیغه اعمال شود و اثرات نیروهای واکنشی بر روی مقاومت داکت در تعامل تیغه-داکت باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این، فرکانس طبیعی تیغه‌های استاتور باید محاسبه شود که باید خارج از محدوده فرکانس‌های پیش‌بینی‌شده پره‌های روتور و جریان باشد.

#### ۱۲- ضرایب بی‌بعد سیستم پیشران پمپ‌جت:

مشخصات عملکرد سیستم پیشران پمپ‌جت را می‌توان مشابه با پروانه معمولی به‌صورت ضرایب بی‌بعد طبق روابط ذیل تعریف نمود که به ترتیب عبارت‌اند از ضریب پیشروی، ضریب گشتاور و تراست. به دلیل آن‌که در این سیستم پیشران استاتور نیز علاوه بر روتور تراست تولید می‌کند بایستی در تعیین تراست کل سیستم رانش این مطلب در نظر گرفته شود. همچنین داکت اطراف روتور و استاتور مقداری از تراست تولیدی را مصرف می‌نماید به همین دلیل تراست کل سیستم پیشران در روابط زیر تعریف شده است. همچنین در تعریف راندمان سیستم پیشران، گشتاور روتور مبنای محاسبات قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی بی‌بعد تراست و یا درگ وارد بر کل بدنه پارامتر تراست باقی‌مانده نیز تعریف شده است. در روابط زیر،  $\pi$  سرعت دورانی روتور،  $V$  سرعت پیشروی بدنه و  $D$  قطر روتور می‌باشد.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (22) \quad \text{ضریب تراست:}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (23) \quad \text{ضریب گشتاور:}$$

برای پیشران‌های داکت دار:

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (24) \quad \text{ضریب تراست داکت:}$$

$$K_{TP} = \frac{T_P}{\rho n^2 D^4} \quad (25) \quad \text{ضریب تراست پیشران:}$$

ضریب تراست کل برای یک پیشران داکت دار:

$$K_{TT} = K_{TP} + K_{TD} \quad (26)$$

ضریب پیشروی:

$$J = \frac{VA}{nD} \quad (27)$$

#### ۱۳- جزئیات عملکرد:

به‌طور کلی پمپ‌جت در سرعت‌های پایین راندمان کمی دارد که به‌نوعی باید آن را یک نقیصه بزرگ برای آن برشمرد. یک پدیده هیدرودینامیکی خاص به نام "جدایش جریان" را می‌توان به‌عنوان علت اصلی کاهش بازده پمپ‌جت در سرعت‌های بسیار پایین شناسایی کرد. به زبان ساده، داکت پیرامونی پمپ‌جت یک مانع اضافی ایجاد می‌کند که آب هنگام حرکت از پیشران باید از آن عبور کند. در سرعت‌های آب بسیار کم، این مانع و مقاومت اضافی برای متوقف کردن مقداری از جریان در حال حرکت از طریق جت کافی است و گرداب‌های ناپایداری ایجاد می‌کند که انرژی را از سیستم کاهش می‌دهد، اما نیروی رانش ایجاد نمی‌کند و در سرعت‌های بسیار کم جریان، کارایی را به صفر می‌رساند.

طراحی پمپ‌جت برای مقاصد نظامی، یعنی کاهش نشانه‌های صوتی و آکوستیکی، به‌طور مؤثری استفاده از داکت را الزام می‌کند. عمل کند کردن آب لزوماً معادل عمل افزایش فشار آن است. این فشار بالا در نقطه‌ای است که تیغه‌ها کار خود را روی آب انجام می‌دهند که تیغه‌ها را قادر می‌سازد از کاویتاسیون (انبساط سریع و فروپاشی حفره‌ها یا حباب‌های کوچک در آب) که منبع بسیار بزرگی برای ایجاد صدا در زیر آب است، اجتناب شود. حفظ این مزیت مستلزم طراحی صحیح داکتی است که سرعت آب را به میزان مطلوب کاهش می‌دهد. عمل کاهش سرعت آب زمانی که به‌کندی پیش می‌رود باعث توقف جریان می‌شود و هنگامی رخ می‌دهد که جدایش جریان اتفاق می‌افتد.

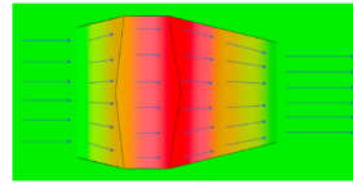
ایجاد و جهت از بین بردن این ناپایداری‌ها تلف شود. به‌طور کلی می‌توان پمپ‌جت‌ها را از نظر داشتن مزایای آکوستیکی نسبت به سایر انواع پیشران‌ها برتر دانست.

#### ۱۴- تفاوت بین نیروی محرکه هسته‌ای و متعارف:

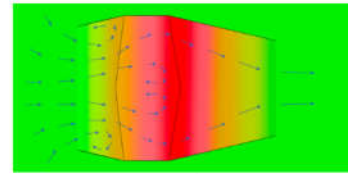
قدرت و انرژی زیردریایی‌های هسته‌ای به دلیل ابزار تولید نیروی خود به‌طور قابل توجهی با زیردریایی‌های معمولی متفاوت هستند. به دلیل چگالی انرژی بسیار بالا در اورانیوم یا پلوتونیوم غنی شده، راکتورهای موجود در زیردریایی‌های هسته‌ای مدار فراوانی انرژی تولید می‌کنند. طبق گزارش‌ها، اکثر راکتورهای زیردریایی می‌توانند بین ۲۵ تا ۵۰ مگاوات (MW) نیرو تولید کنند، اگرچه زیردریایی‌های روسی صدها مگاوات توان در دسترس دارند.

در مقابل، موتور اصلی زیردریایی کلاس کالینز در کمتر از ۶ مگاوات رتبه‌بندی می‌شود و طرح‌های زیردریایی آینده فقط کمی بیشتر به نظر می‌رسد. منصفانه است که بگوییم از نظر حداکثر توان خروجی، زیردریایی‌های هسته‌ای می‌توانند چیزی حدود ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از زیردریایی‌های دیزلی-الکتریکی - حتی در اوج توان خود- توان تولید کنند. با این حال، تفاوت بین اوج قدرت زیردریایی‌ها به‌طور قابل توجهی نشان می‌دهد که طراحی‌ها چقدر متفاوت هستند، زیرا تفاوت در مقدار کل انرژی ذخیره شده و در دسترس برای استفاده در یک سفر دریایی یا غواصی بسیار بیشتر است.

یک زیردریایی هسته‌ای ممکن است به‌طور گسترده‌ای عملاً برای همه مقاصد در یک سفر مشخص نامحدود به معنای واقعی کلمه میلیون‌ها برابر انرژی بیشتری در اختیار داشته باشد. در نتیجه، هنگامی که یک زیردریایی هسته‌ای ممکن است به‌طور منظم ترانزیت‌ها را با حداکثر توان خود یا نزدیک به آن انجام دهد، یک زیردریایی برقی دیزلی احتمالاً با کمتر از نیمی از سرعت متوسط در کل مسیر حرکت می‌کند (و کمتر از یک‌چهارم انرژی مشابه با زیردریایی هسته‌ای را مصرف می‌کند) و هنگام گشت زنی ممکن است با یک‌دهم حداکثر سرعت کار کند و شاید فقط ۱٪ از همان قدرت را در پیشران مصرف کند.



(a)



(b)

شکل ۱۰: (a) در سرعت‌های بالا، ورودی یک پمپ‌جت جریان آب را کند می‌کند و فشار آن را افزایش می‌دهد و متعاقباً از طریق نازل انقباض شتاب می‌گیرد تا یک جت کارآمد تشکیل دهد (b) در سرعت‌های پایین، گرادیان فشار ایجادشده توسط داکت باعث می‌شود مقداری از جریان آب متوقف و معکوس شود. این «جدایش جریان» انرژی آب چرخان را در دایره‌ها هدر می‌دهد و کارایی سیستم را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

جدایش جریان پیامدهای آکوستیکی نیز دارد؛ گرداب‌هایی که در اثر جدایش جریان ایجاد می‌شوند معمولاً ناپایدار هستند و به‌طور دوره‌ای به جریان اصلی می‌ریزند که منجر به نوسانات فشار در داخل داکت می‌شود و انواع شدیدتر و ناپایدارتر از توربولانس ناپایدار در مقیاس بزرگ با وارد شدن این گرداب‌ها به پره‌های روتور رخ می‌دهد. این اثرات احتمالاً باعث ایجاد علائم آکوستیکی می‌شود که با کاهش سرعت زیردریایی فرکانس آن‌ها کمتر می‌شود. این برخلاف مراحل اولیه کاویتاسیون است، که در زمانی که اندازه حباب‌ها کوچک است، فرکانس بالایی دارد و با افزایش سرعت و گسترش حباب‌ها به فرکانس‌های پایین‌تر می‌رود. در سرعت‌های بالاتر نیز به دلایلی که قبلاً ذکر شد جدایش جریان کاهش یافته و مزیت آکوستیکی بیشتر می‌شود. فرکانس‌های پایین‌تر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، زیرا تمایل به انتشار بیشتر دارند و به‌طور مؤثری توسط داکت محافظت می‌شوند. این احتمال وجود دارد که در غیاب کاویتاسیون، سروصدای ایجادشده در پیشران توسط جدایش جریان به اندازه کافی بلند نباشد که نگرانی تاکتیکی قابل توجهی داشته باشد؛ جدایش جریان مستلزم آن است که دو یا سه برابر بیشتر انرژی توسط پمپ‌جت

در چنین شرایطی، مقدار نیرویی که برای روشنایی، پاک‌سازی CO<sub>2</sub>، شستشو، پخت‌وپز، گرمایش و همچنین وسایل الکترونیکی که سیستم‌های جنگی را به حرکت درمی‌آورند (بار هتل) ممکن است قابل توجه باشد و حتی به اندازه توان موردنیاز پیش‌ران‌ش یا بزرگ‌تر باشند. در نتیجه، تفاوت بین توان خروجی یک زیردریایی معمولی و یک زیردریایی هسته‌ای که ممکن است به‌طور منظم در آن کار کند، می‌تواند بسیار بیشتر از حداکثر مقدار انرژی باشد که آن‌ها می‌توانند به سیستم‌های پیش‌ران خود اختصاص دهند. این موضوع عواقب قابل توجهی برای طراحی تمام سیستم‌های زیردریایی از جمله سیستم پیش‌ران دارد.

نیروی مقاوم درگ مستقیماً انرژی موردنیاز برای طی کردن یک مسافت معین را تعیین می‌کند. فیزیک مربوط به زیردریایی‌ها مستلزم آن است که درگ با مجذور سرعت افزایش یابد و توان موردنیاز یک کشتی برای رسیدن به مقیاس سرعت معین با مکعب سرعت افزایش می‌یابد. در نتیجه، انرژی موردنیاز برای حرکت یک کشتی در یک فاصله معین می‌تواند به‌شدت در سرعت‌های مختلف متفاوت باشد.

این بدان معناست که اکثر کشتی‌ها می‌توانند با حرکت بسیار آهسته، تقریباً بدون توجه به جزییات نحوه طراحی و سیستم‌های محرکه‌ای که استفاده می‌کنند، مسافت بسیار بیشتری بپیمایند. همچنین به این معنی است که تقریباً تمام توجه طراحی سیستم پیش‌ران بر «سرعت طراحی» متمرکز است، که عموماً بسیار نزدیک به حداکثر سرعت است، زیرا در سرعت بسیار پایین، نیروی رانش بسیار کمی (بنابراین سوخت کمتری) موردنیاز است و مقدار بازده چندان نگران‌کننده نیست. با این حال، برای زیردریایی‌های معمولی، وضعیت بسیار متفاوت است. در حال حاضر از سرعت‌های بسیار پایین (۸ تا ۱۰ نات) برای حمل‌ونقل استفاده می‌کنند تا مسافتی را که می‌توانند از انرژی ذخیره‌شده خود دریافت کنند به حداکثر برسانند. حتی بیشتر حمل‌ونقل‌های تجاری، معمولاً بسیار سریع‌تر انجام می‌شود (۱۶-۲۴ نات). هنگامی که یک زیردریایی در زیر سطح پیمایش و غواصی می‌کند، به باتری‌های خود متکی است، که ممکن است بتواند کمتر از ۱٪ از انرژی ذخیره‌شده در سوخت دیزل خود را در باتری‌ها ذخیره کند و در نتیجه باید دوباره سرعت خود را کاهش دهد (۴

نات) تا قبل از بازگشت به سطح دریا و شارژ مجدد بتواند مسافت معنی‌داری را بپیماید. در حالی که سرعت‌های بسیار بالاتر حتی در هنگام غواصی تا ۲۰ نات امکان‌پذیر است، این تأثیر چشمگیری بر قدرت موردنیاز دارد که نمی‌توان آن را برای دوره‌های زمانی زیادی حفظ کرد و در نتیجه فقط در مواقع اضطراری یا بسیار خاص می‌توان سرعت را بالا برد. از آنجایی که یک زیردریایی معمولی برای به‌دست‌آوردن برد غواصی و استقامت خوب باید سرعت خود را تا مقدار کمی کاهش دهد؛ کارایی پیش‌ران اکنون اهمیت بسیار زیادی پیدا می‌کند، زیرا راندمان ضعیف در اینجا تأثیر قابل توجهی بر روی مدت زمان بازگشت آن‌ها به سطح جهت شارژ مجدد خواهد داشت. در مقابل زیردریایی‌های هسته‌ای ذخایر انرژی نامحدودی دارند و برای استفاده از آن نیازی به هوا و اکسیژن ندارند و در نتیجه این نگرانی‌ها را ندارند. همچنین ممکن است در نتیجه بتوانند زمان بیشتری از غواصی خود را با سرعت‌های بسیار بالاتر سپری کنند.

#### ۱۵- مسمومیت با زنون و محدودیت کاهش توان در زیردریایی‌های هسته‌ای:

شاید مهم‌ترین مورد برای طراحی توان زیردریایی‌های هسته‌ای، پدیده‌ای به نام مسمومیت زنون است که کمتر مورد بحث قرار گرفته که راکتورهای هسته‌ای زمانی که خاموش می‌شوند یا قدرت خود را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هنگامی که اتم‌های اورانیوم یا پلوتونیوم به دو اتم ایزوتوپ کوچک‌تر تقسیم می‌شوند (یا شکافت می‌شوند)؛ انواع مختلفی از رادیو هسته‌های مختلف (انواع ناپایدار اتم‌ها) تولید می‌شوند. دو مورد از آن‌ها زنون-۱۳۵ و ید-۱۳۵ هستند. ید خیلی بیشتر تولید می‌شود و به سرعت به زنون-۱۳۵ تجزیه می‌شود (که نیمه عمر آن حدود ۹ ساعت است) و این فرآیندی است که اکثریت زنون را در راکتور تولید می‌کند. این زنون نقش بسیار ویژه و شاید منحصربه‌فردی در راکتورها دارد؛ زیرا آن‌ها به راحتی نوترون‌های آزادی را جذب می‌کنند که باعث ادامه واکنش‌های شکافت اورانیوم یا پلوتونیوم می‌شوند که راکتور را به حرکت درمی‌آورند. به این ترتیب، زنون به‌عنوان "سم" راکتور شناخته می‌شود زیرا می‌تواند واکنش‌پذیری راکتور را در دوزهای بسیار بالا از بین ببرد.

این جذب نوترون بالا از زنون به این معنی است که رابطه دوگانه ای با سطح توان راکتور دارد. در سطوح بالای قدرت راکتور، مقدار زیادی زنون-۱۳۵ و ید-۱۳۵ توسط فرآیند شکافت تولید می شود. حضور زیاد زنون باعث کاهش واکنش پذیری راکتور می شود. اما فرآیند دیگری در جهت مخالف عمل می کند که این امر را خنثی می کند و نوترون های زیادی را که برای «سوزاندن» زنون در دسترس هستند را جذب می کند تا به ایزوتوپ متفاوت تبدیل شوند. این عمل مقدار کلی زنون را در کنترل نگه می دارد.

هنگامی که راکتور دچار تغییر ناگهانی در توان خروجی می شود، وضعیت به طور ناگهانی تغییر می کند. اگر توان به طور چشمگیر و ناگهانی کاهش یابد، تولید زنون برای مدتی به دلیل اضمحلال ذخایر بزرگاید-۱۳۵ به سرعت ادامه می یابد. با شار نوترونی کمتری که برای «سوختن» زنون در دسترس است، سطح زنون افزایش می یابد و واکنش پذیری راکتور را پایین می آورد. مگر اینکه راکتور به سرعت به توان نسبتا بالا (۰.۶۰٪) خیلی سریع (یک ساعت یا کمتر) برگردد وگرنه سطح زنون آنقدر بالا می رود که راکتور باید خاموش شود. در غیر این صورت اقدامات شدید (و خطرناک) برای ادامه کار راکتور مورد نیاز است. (این اساسا همان چیزی است که منجر به انفجار چرنوبیل شد).

در نتیجه، راکتورهای هسته ای برای نوسانات سریع توان، به ویژه کاهش چشمگیر توان، مناسب نیستند، زیرا این امر می تواند منجر به بی ثباتی در هسته راکتور شود. اگر راکتور به منظور اجتناب از چنین شرایط خطرناکی خاموش شود، معمولا تا زمانی که سطح زنون دوباره کاهش پیدا نکند، نمی توان آن را دوباره راه اندازی کرد، که ممکن است چند روز طول بکشد. بدیهی است که این امر برای یک زیردریایی نظامی مطلوب نیست و از این رو تقریبا به هر قیمتی از آن اجتناب می شود. این اثر، تأثیر چشمگیری بر طراحی زیردریایی های هسته ای دارد؛ زیرا بیشتر طراحی آن ها به جای حفظ توان حول این است که بتوانند به راحتی مقادیر زیاد توان اضافی را به سهولت پراکنده کنند. این موضوع داشتن یک پیشران کم راندمان در سرعت های پایین مانند پمپ جت را به یک مزیت قابل توجه تبدیل می کند. از آنجایی که راکتور به احتمال زیاد به ویژه در هنگام کاهش سرعت نیاز به دفع توان اضافی

دارد، یک سیستم محرکه کم راندمان در سرعت پایین یک منبع جذب انرژی را فراهم می کند. به شرطی که توربولانس بیش از حد داخل پمپ جت خیلی پرسروصدا نباشد، هدر دادن انرژی از طریق پیشران در مواقعی که مازاد وجود داشته باشد در سرعت هایی کمتر از حداکثر سرعت مفید است.

#### ۱۶- نتیجه گیری و جمع بندی:

همان طور که در پیش تر آمد؛ استفاده از پیشران های داکت دار مزایای زیادی دارد و تمامی کشورهای پیشرفته در حال کار بر روی آن هستند. با توجه به مزایای بیشمار استفاده از قوای محرکه هسته ای در زیردریایی ها و سایر وسایل نقلیه دریایی، پمپ جت با توجه به مزایای آکوستیکی و همچنین محدودیت های پدیده مسمومیت با زنون و کاهش توان در راکتورهای هسته ای، کاندید مناسبی برای سیستم های پیشران دریایی با محرک هسته ای به نظر می رسد. با توجه به اینکه پمپ جت ها در سطح دنیا دوران رشد و تکامل خود را می گذرانند و دائما آرایش های مختلف و بهینه سازی های متعدد از آنان ارائه می شود، تحقیق و پژوهش بر روی آن ها جهت نیل به روش طراحی مطلوب و انتخاب کارآترین نمونه آن کارساز خواهد بود.

#### ۱۷- فهرست علائم :

V	سرعت،
A	مساحت، m <sup>2</sup>
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
PT	توان پیشران،
Vs	سرعت شناور،
KQ	ضریب گشتاور نرمال پروانه
$\psi$ و $\phi$	ضرایب انتقال انرژی جریان
H	هد پمپ
$\eta_p$	بازده پمپ
hp	افت هد پمپ
$\eta_D$	بازده دیفیوزر
hD	افت هد داخلی پمپ

Ocean Engineering Volume 191, 1 November 2019, 106520.

[9] Lin Lu, Yuefei Gao, Qiang Li, Lin Du, "Numerical investigations of tip clearance flow characteristics of a pumpjet propulsor", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering Volume 10, Issue 3, May 2018, Pages 307-317.

[10] Jie Gong, Chun-yu Guo, Tie-cheng Wu, Da-gang Zhao, "Particle image velocimetry measurement of velocity distribution at inlet duct of waterjet self-propelled ship model", Journal of Hydrodynamics, Ser. B Volume 29, Issue 5, October 2017, Pages 879-893.

[۱۱] بررسی عددی رفتار هیدرودینامیکی و پارامترهای سیالاتی میدان جریان حول سیستم رانش پمپ جت، احسان یاری، سید مهدی اعرابی مقدم، بیست و نهمین همایش سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه‌های حرارتی

[۱۲] طراحی سیستم رانش پمپجت CRP، نوروز محمد نوری، صابر محمدی، اولین همایش پیشرفته‌های دریایی

[۱۳] شبیه‌سازی عددی دنباله جریان پشت سیستم رانش پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۴] استخراج منحنی عملکرد یک نمونه تحقیقاتی سیستم پیشران‌ش پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۵] مطالعه سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت‌بالا، مهران مطلبی نژاد، حسن قاسمی، چهارمین همایش ملی شناورهای تندرو

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

[۱۷] مونسان، م. م.، کتاب جامع مهندسی معماری دریایی، انتشارات کمالی نژاد، ۱۳۹۱

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

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

نسبت ورودی و خروجی دیفیوزر  $\varepsilon$

Ns سرعت ویژه ماشین

n سرعت دورانی روتور،

V سرعت پیشروی بدنه

D قطر روتور

### ۱۸-مراجع:

[1] Denghui Qin, Qiaogao Huang, Guang Pan, Yao Shi, Peng Han, Xinguo Dong, "Effect of the duct and the pre-swirl stator on the wake dynamics of a pre-swirl pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 237, 1 October 2021, 109620.

[2] Denghui Qin, Qiaogao Huang, Guang Pan, Yao Shi, Peng Han, Xinguo Dong, "Comparison of hydrodynamic performance and wake vortices of two typical types of pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 224, 15 March 2021, 108700.

[3] Xiaohui Luo, Qiuping Li, Zuti Zhang, Jijian Zhang, "Research on the underwater noise radiation of high pressure water jet propulsion", Ocean Engineering Volume 219, 1 January 2021, 108438.

[4] Lin Lu, Chen Wang, Denghui Qin, "Numerical investigations of flow characteristics of a pumpjet propulsor in oblique inflow", Applied Ocean Research Volume 103, October 2020, 102343.

[5] Chengcheng Qiu, Qiaogao Huang, Guang Pan, Yao Shi, Xinguo Dong, "Numerical simulation of hydrodynamic and cavitation performance of pumpjet propulsor with different tip clearances in oblique flow", Ocean Engineering Volume 209, 1 August 2020, 107285.

[6] Han Li, Qiaogao Huang, Guang Pan, Xinguo Dong, "The transient prediction of a pre-swirl stator pump-jet propulsor and a comparative study of hybrid RANS/LES simulations on the wake vortices", Ocean Engineering Volume 203, 1 May 2020, 107224.

[7] Denghui Qin, Guang Pan, Seongkyu Lee, Qiaogao Huang, Yao Shi, "Underwater radiated noise reduction technology using sawtooth duct for pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 188, 15 September 2019, 106228.

[8] Han Li, Guang Pan, Qiaogao Huang, "Transient analysis of the fluid flow on a pumpjet propulsor",