J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 45, 2025. (42-56)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Conceptual Design and Analysis of a Waterjet Propulsion System Using a Statistical Parameter Extraction Method

Soroush Sarafan Sadeghi[1*], Vahid Esfahanian[2], Amirmohammad Arjomand Kermani[3]

*Post-doctorate, Faculty of Mechanical Engineering, Faculties of Engineering, University of Tehran (soroush.s.s@aut.ac.ir) [*1]*
[2] Full Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Faculties of Engineering, University of Tehran (evahid@ut.ac.ir)
[3] Master's degree, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA (arjomand.5@osu.edu)

ARTICLE INFO

Article History:
Received: *27 Nov 2024*
Last modification: 25 Feb 2025
Accepted: *3 Mar 2025*
Available online: *3 Mar 2025*

Article type:
Research paper

Keywords:
Waterjet Propulsion System
Conceptual Design
Statistical Design
Design Algorithm

ABSTRACT

This research presents a comprehensive data-driven and modeling-based approach to facilitate and improve the design process of waterjet propulsion systems. Initially, a comprehensive statistical design model is developed by extensively reviewing the existing literature and collecting experimental data from commercial examples. Subsequently, two conceptual design algorithms are proposed based on this model to streamline the initial design process. The accuracy and validity of these algorithms are evaluated by comparing their results with available experimental data. Finally, as a case study, a conceptual design of a 500 kW waterjet propulsion system is carried out using these algorithms. The results of this research demonstrate that the proposed method is an efficient and accurate approach for the conceptual design of waterjet propulsion systems. By combining statistical analysis and modeling, this method enables rapid and accurate estimation of design parameters. Additionally, by providing a systematic framework, it assists designers in achieving optimal designs.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۵، ۱۴۰۴، (۵۶-۴۲)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی و طراحی مفهومی یک سامانه پیشرانش جت آب با استفاده از روش استخراج پارامترهای اولیه بر مبنای طراحی آماری

سروش صرافان صادقی[۱*]، وحید اصفهانیان[۲]، امیرمحمّد ارجمند کرمانی[۳]

[۱*] پسادکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران (soroush.s.s@aut.ac.ir)

[۲] استاد تمام، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران (evahid@ut.ac.ir)

[۳] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه ایالتی اوهایو، کلامبس، اوهایو، آمریکا (arjomand.5@osu.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

سامانه پیشرانش جت آب

طراحی مفهومی

طراحی آماری

الگوریتم طراحی

چکیده

در این پژوهش، باهدف تسهیل و بهبود فرآیند طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب، یک رویکرد جامع مبتنی برداده و مدل‌سازی ارائه‌شدهشده‌است. ابتدا، با مرور گسترده ادبیات موجود و جمع‌آوری داده‌های تجربی از نمونه‌های تجاری، یک مدل طراحی آماری جامع توسعه یافت. سپس، دو الگوریتم طراحی مفهومی بر اساس این مدل، برای تسهیل فرآیند طراحی اولیه ارائه شد. صحت و دقت این الگوریتم‌ها با مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با داده‌های تجربی موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت، با استفاده از این الگوریتم‌ها، طراحی مفهومی یک سامانه پیشرانش جت آب با توان ۵۰۰ کیلووات به‌عنوان نمونه انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، روشی کارآمد و دقیق برای طراحی مفهومی سامانه‌های پیشرانش جت آب است. این روش با ترکیب تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی، امکان تخمین سریع و دقیق پارامترهای طراحی را فراهم می‌کند. همچنین، با ارائه یک چارچوب سامانمند، به طراحان کمک می‌کند تا به طراحی بهینه دست یابند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

۱- مقدمه

سامانه پیشرانش جت آب، به‌عنوان یک فناوری نوین در صنعت دریایی، به‌واسطه بهره‌گیری از اصل عکس‌العمل، نیروی رانش لازم برای حرکت شناور را فراهم می‌کند. در این سامانه، آب از طریق یک ورودی مکش وارد پمپ شده، تحت‌فشار قرارگرفته و سپس با سرعت‌بالا از یک نازل خارج می‌شود. این عمل، طبق قانون سوم نیوتن، نیروی رانشی در جهت مخالف ایجاد می‌کند. علیرغم مزایای متعدد این سامانه‌ها همچون مانور پذیری بالا و قابلیت کار در آب‌های کم‌عمق، طراحی بهینه آن‌ها به‌دلیل پیچیدگی‌های هیدرودینامیکی و وجود پارامترهای متعدد، همچنان یک چالش مهندسی محسوب می‌شود.

در این سامانه‌ها معمولاً آب به‌صورت مستقیم از طریق ورودی مکش که در زیر شناور قرار دارد، وارد سامانه می‌شود. اکثر کشتی-ها یک ورودی مکش دارند؛ البته به‌کارگیری بیش از یک جت آب و درنتیجه ورودی‌های مکشی متعدد موجب افزایش توان پیشرانشی سامانه می‌شود که در طراحی شناورهای بزرگ‌تر ضروری است [1]. آب با گذر از کانال ورودی وارد بخش اصلی سامانه می‌شود. با توجه به شرایط اولیه که در حالت سکون قرار دارد، آب فاقد انرژی کافی است، بنابراین در راستای ایجاد نیروی پیشرانشی، آب باید به سیالی باانرژی بالا تبدیل شود. به همین دلیل شفتی دربرگیرنده تیغه‌های متحرک و تیغه‌های ثابت برای ایجاد اغتشاش در این واحد قرارگرفته است. این تیغه‌ها موجب افزایش قابل‌توجه فشار آب می-شود، بخش بعدی سامانه نیازمند دستگاهی است که قادر به تبدیل انرژی سیال از حالت فشار به‌سرعت باشد، درنتیجه یک نازل در انتهای واحد پمپ تعبیه می‌گردد. درنهایت با توجه به اصل بقای ممنتوم خطی می‌توان به حضور دو عنصر اساسی بر مقدار نیروی اعمالی پیشرانش جت آب اثرگذارند، این دو عنصر دبی جرمی و سرعت آب در خروج از نازل است. هرچه دبی جرمی آب یا سرعت خروجی آن از نازل افزایش یابد، نیروی رانشی به‌دست‌آمده افزایش خواهد یافت. ظهور چنین سامانه‌هایی به سال ۱۹۳۲ میلادی بازمی‌گردد؛ هنگامی‌که مهندس ایتالیایی، سکاندو کمپینی از قایقی مجهز به سامانه پیشرانش پمپ آب پرده برداشت که می‌توانست با رسیدن به بیشینه سرعت ۲۸ گره دریایی با شناورهایی که به موتورهای معمول آن زمان مجهز بودند رقابت کند [3] ,[2]. اولین قایق مدرن مجهز به چنین سامانه‌های در نیوزیلند و توسط سر ویلیام همیلتون در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافت[4].

در راستای روش طراحی سامانه جت آب، هیت و دیویس [5] در تحقیقات خود از اهمیت درنظر گرفتن بخش‌های گوناگون شناورها به‌منظور طراحی سامانه پیشرانش مناسب برای آن‌ها سخن گفتند و روشی را که در آن معیار انتخاب پیشرانش شناور عملکرد کلی کشتی و نه‌تنها راندمان سامانه پیشرانش برمی‌شمارد، موردبحث و بررسی قراردادند. آرکند و همکارانش [6] در بررسی‌های خود تلاش کردند یک نمونه سامانه پیشرانش جت آب که با توربین گاز قدرت رسانی می‌شود، را تحلیل و بهینه‌سازی نمایند؛ نتایج بهینه‌سازی از تأثیر به‌سزای هندسه سامانه پیشرانش و سرعت شناور در عملکرد پیشرانشی حکایت داشت. در ادامه، برنداو [7] تلاش به بررسی آماری سامانه‌های پیشرانش جت آب کرد و اذعان نمود اگرچه ظهور چنین فناوری‌هایی در حوزه شناورهای پرسرعت ارزشمند و مهم است، اما کمبود داده‌های تجربی در مورد عملکرد و ارزیابی آن‌ها و همچنین موانع پیش رو در طراحی این سامانه‌ها نشان-دهنده لزوم اجرای آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی آن‌هاست. نوبویوکی فوجیساوا [8] در بررسی‌های خود به تحلیل تجربی قسمت‌های گوناگون یک سامانه پیشرانش جت آب در فضای شبیه‌سازی تجربی تونل آب پرداخت و در ادامه با تغییر ساختمان نازل و قطر مجرا خروجی آن سعی در بهینه‌سازی بازده و عملکرد این سامانه داشت. اُه و همکارانش [9] با استفاده از روش‌های محاسباتی در دینامیک سیالات در سه بعد و به کمک تحلیل خطوط جریان به بررسی عملکردی و بهینه‌سازی طراحی یک سامانه پیشرانش با پمپ جریان مختلط پرداختند. آزمایش‌های تجربی نیز بر روی این مدل صورت پذیرفت که تطابق نتایج شبیه-سازی و تجربی نمایانگر صحت فرایند تحلیل بود. بولتن [10] به مقایسه مشخصات هندسی پمپ‌های جریان محوری و مختلط پرداخت و برتری‌های پمپ جریان محوری بر نمونه دیگر در زمینه-های عملکردی را بیان نمود. کیم و همکارانش [11] بابیان برتری سامانه‌های پیشرانش جت آب بر سامانه‌های معمول به بررسی بخش مهمی از چنین سامانه‌ای اقدام نمودند. این مقاله تلاش کرد با بررسی اثرات ناشی از تغییرات قطر پروانه‌های پمپ بر روی وزن سامانه و عملکرد کلی آن، به بهینه‌سازی این پارامتر مهم برای یک نمونه سامانه پیشرانش خاص که بر روی یک وسیله نقلیه دوزیست نصب‌شده بود، بپردازد. بونایوتی و همکارانش [12] به طراحی پارامتریک یک سامانه پیشرانش جت آب با جریان مختلط پرداختند. و در آن شیوه طراحی معکوس هندسه پروانه پمپ و دیفیوزر به‌صورت پارامتریک فرموله شد و با بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی در دینامیک سیالات، اقدامات صورت گرفته ارزیابی گردید. در ادامه، وئو و همکارانش [13] به بررسی عددی و تجربی مفهوم جت پیشرانش با حباب افزوده اقدام کرده و پس از طراحی، بهینه‌سازی صورت پذیرفت. گو و همکارانش [14] در راستای پیشرفت بررسی عمق‌های اقیانوس‌ها، به طراحی سازه و مدارات داخلی یک دستگاه پیشرانش جت آب کروی زیردریایی پرداختند و در ادامه با انجام آزمایش‌های تجربی، به امکان‌سنجی طراحی خود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

اقدام نمودند. یو و همکارانش [15] سازه مکانیکی سامانه پیشرانش جت آب را برای یک ربات زیردریایی کروی تحلیل کردند. بابیان معایب این دستگاه، سعی در بهبود مشخصات آن شد. آلتوسول و همکارانش [16] به معرفی شیوه‌ای محاسباتی در مراحل اولیه طراحی سامانه پیشرانش مناسب برای شناورها باشد، روی آوردند. کنداسمی و همکارانش [17] در تحقیقات خود سعی در تحلیل عددی و تجربی مدل خاصی از این نوع سامانه پیشرانش داشتند و با به‌کارگیری روش‌های عددی به بهینه‌سازی مشخصات هندسی آن اقدام کردند. قدیمی و همکارانش [18] به بررسی پارامترهای عملکردی شناوری که مجهز به یک سامانه پیشرانش جت آب بود پرداختند و مشخصات هیدرودینامیکی آن را معرفی و بررسی نمودند.

نی و همکارانش [19] در پژوهش خود یک نمونه جت آب با جریان محوری را موردبررسی قراردادند تا از طریق شیوه تجمع فشار سطحی و ممنتوم، نیروی پیشرانشی سامانه ارزیابی گردد و اهمیت نقش نازل در عملکرد کلی دستگاه معین شود. گانگا و همکارانش [20] به تحلیل و بررسی تجربی و عددی یک شناور با چهار سامانه جت آب پرداختند تا تأثیر تغییر زاویه تنه کشتی بر نیروی پیشرانشی و ضرایب سرعت و انرژی را بررسی کنند. همچنین با مقایسه نتایج عددی و تجربی به بررسی میزان تطابق این نتایج پرداختند. در همان سال، هوآنگ و همکارانش [21] در پژوهش‌های خود به‌صورت جزئی به بررسی نوع فلاش-مجرا ورودی این سامانه پرداختند و در ادامه با استفاده از روش‌های عددی به‌منظور بررسی پارامترهای هندسی آن در راستای بهینه‌سازی عملکرد این بخش مهم سامانه پیشرانش جت آب تلاش کردند. در ادامه تحقیقات در این حوزه، ونگ و همکارانش [22] در تحقیقات خود نازل را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سامانه پیشرانش جت آب که وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی پمپ به انرژی جنبشی آب را عهده‌دار است، بررسی کردند و پارامترهای کلیدی آن ازجمله هندسه مجرا-های ورودی و خروجی را به‌صورت عددی و تجربی شبیه‌سازی نموده تا به بهترین ساختمان نازل در راستای رسیدن به بیشینه بازدهی برسند. همچنین در همان سال، جیاو و همکارانش [23] به طراحی بهینه مجرا ورودی سامانه پیشرانش اقدام کردند تا با بررسی پارامترهای هندسی و جریان و همچنین استفاده از روش-های تجربی و عددی به مشخصات هیدرودینامیکی این بخش دست یابند؛ از طرفی نتایج تجربی و عددی مقایسه گردیدند و صحت روش‌های عددی ارزیابی و روشن گردید. در همان حین، ژنگ و همکارانش [24] پارامترهای کلیدی مانند نیروی پیشرانشی، میزان افت این نیرو و مقاومت سامانه پیشرانش جت آب را با استفاده از روشی تکرارشونده شبیه‌سازی نمودند؛ پس از سنجش میزان خطای این روش، امکان استفاده از آن در طراحی سامانه جت آب مختص کشتی‌ها تائید شد. در ادامه، کاستا و همکارانش [25] تلاش به امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های پیشرانش جت آب در نوع خاصی از کشتی‌های ارتش برزیل کردند، چراکه سامانه‌های معمول فرمان‌پذیری محدودی داشته و برای استفاده در اعماق کم توصیه نمی‌شوند. درنهایت آن‌ها با عمومیت بخشی به کار خود، روش خود را مناسب برای تعیین بهینه‌ترین سامانه پیشرانش برای شناورهایی با کاربرد نظامی، تفریحی و تجاری برمی‌شمردند.

در این پژوهش، باهدف ارتقاء فرآیند طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب، ابتدا به بررسی جامع ادبیات موجود و شناسایی انواع مختلف این سامانه‌ها پرداخته‌شده‌است. سپس، با تحلیل عمیق داده‌های تجربی حاصل از مطالعات پیشین، روابط حاکم بر عملکرد این سامانه‌ها استخراج‌شده و مدل‌های ریاضی دقیقی برای توصیف رفتار آن‌ها ارائه گردیده است. در ادامه، با بهره‌گیری از این مدل‌ها، یک روش طراحی آماری نوین برای تعیین مشخصات بهینه سامانه‌های پیشرانش جت آب توسعه یافته‌است. این روش به طراحان امکان می‌دهد تا با دقت بیشتری به طراحی سامانه‌های پیشرانش پرداخته و بهینه‌ترین مشخصات را برای هر کاربرد خاص انتخاب نمایند. در انتها، برای ارزیابی صحت و دقت روش پیشنهادی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده‌است.

شایان ذکر است که در این مقاله از روش‌های سنتی‌تر برای طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب استفاده شده‌است. استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری عمیق نیز می‌تواند در این زمینه مفید باشد، اما به‌دلیل محدودیت‌های موجود در داده‌ها و پیچیدگی مدل‌سازی این سیستم‌ها، در این پژوهش از این روش‌ها استفاده نشده‌است. در بخش‌های آینده، به طور مفصل در مورد مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها بحث خواهد شد.

۲- طراحی مفهومی

در این قسمت به بیان روش ریاضی فرمول‌های پایه طراحی مفهومی یک سامانه پیشران جت آب می‌پردازیم [8]، بر همین اساس طبق قانون پایستگی جرم، دبی ورودی به سامانه برابر است با دبی خروجی از سامانه؛ درنتیجه داریم (معادله (۱)):

$$\dot{m}_i = \dot{m}_o \rightarrow \rho_i Q_i = \rho_o Q_o \quad (۱)$$

با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن آب دریا می‌توان نوشت (معادله (۲)):

$$\rho_i = \rho_o \rightarrow \rho \approx 1036\ \mathrm{kg/m^3} \quad (۲)$$

در ادامه نتیجه می‌گیریم (معادلات (۳) و (۴)):

$$Q = Q_i = Q_o \rightarrow A_i V_i = A_o V_o \quad (۳)$$

$$\frac{\pi}{4} D_i^2 V_i = \frac{\pi}{4} D_o^2 V_o \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{D_i}{D_o}\right)^2 \quad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

اکنون به تعریف نسبت کاهش نازل می‌پردازیم که به شکل زیر نمایش داده می‌شود (معادله (۵)):

$$C = \frac{A_o}{A_i} = \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2 \quad (۵)$$

درنتیجه می‌توان سرعت خروجی از نازل را به‌صورت زیر ساده‌سازی نمود (معادله (۶)):

$$A_i V_i = A_o V_o \rightarrow V_o = \frac{V_i}{C} \quad (۶)$$

نسبت کاهش نازل در سامانه‌های پیشرانش جت آب معمولاً در بازه زیر قرار دارد (معادله (۷)):

$$0.2 < C < 0.6 \quad (۷)$$

در ادامه به بررسی نیروی حاصل از پیشرانش می‌پردازیم، همان‌طور که پیش‌تر گفته‌شده می‌توان نوشت (معادله (۸)):

$$T = \rho Q (V_o - V_i) \quad (۸)$$

عبارت فوق را می‌توان بر اساس داده‌های ورودی سامانه بازنویسی نمود (معادله (۹)):

$$T = \rho A_i V_i^2 \left(\frac{1}{C} - 1\right) \quad (۹)$$

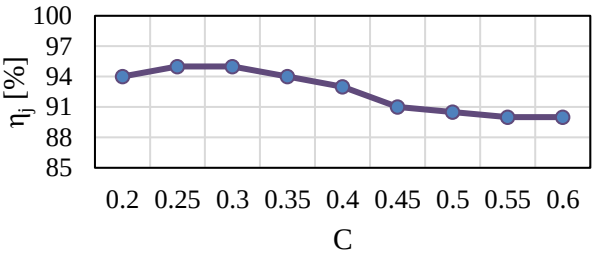
توان پیشرانشی نیز از رابطه زیر قابل‌محاسبه است (معادله (۱۰)):

$$P_T = T V_S \quad (۱۰)$$

در این رابطه V_S سرعت شناور است که در قایق‌های تفریحی کوچک و متوسط معمولاً در بازه ۲ الی ۱۰ متر بر ثانیه (۴ الی ۲۰ گره دریایی) قرار دارد. همچنین هد فشاری ناشی از پمپ توسط معادله (۱۱) زیر قابل‌محاسبه است:

$$H = \frac{1}{2g}\left(\frac{V_o^2}{\eta_j} - V_S^2(1 - \zeta_i)\right) \quad (۱۱)$$

در رابطه بالا η_j بازده نازل است که غالباً بین ۹۰ الی ۹۵ درصد با توجه به نسبت کاهش نازل متغیر است. که در نمودار شکل ۱ نشان داده شده‌است، نمودار شکل ۱ و ۲ بر اساس داده‌های تحقیق فوجیساوا [8] رسم شده‌است.



شکل ۱: رابطه‌ی بین بازده نازل برحسب نسبت کاهش آن. [1]

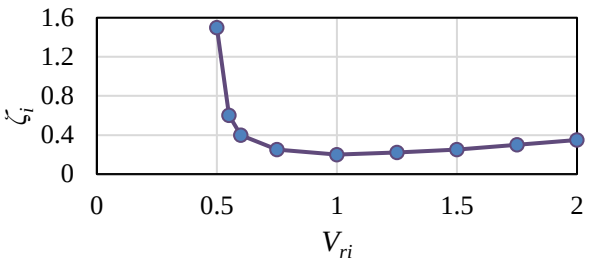
بنا بر نمودار بالا، بهینه‌ترین نمونه نازل دارای نسبت کاهش ۰/۲۵ یا ۰/۳ است که بازدهی ۹۵٪ را ارائه می‌دهد. در رابطه هد فشاری پمپ، ζ_i ضریب اتلاف ورودی سامانه است که در بازه زیر قرار دارد (معادله (۱۲)):

$$0.2 < \zeta_i < 1.5 \quad (۱۲)$$

مقدار این ضریب تابعی از نسبت سرعت ورودی است که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (معادله (۱۳)):

$$V_{ri} = \frac{V_i}{V_S} \quad (۱۳)$$

نمودار شکل ۲ تغییرات ضریب اتلاف ورودی را برحسب نسبت سرعت ورودی نشان می‌دهد.



شکل ۲: تغییرات ضریب اتلاف ورودی برحسب نسبت سرعت ورودی [8].

شایان‌ذکر است در بسیاری از موارد مرتبط با قایق‌ها و شناورهای تفریحی کوچک و متوسط می‌توان نوشت (معادله (۱۴)):

$$V_S = V_i \rightarrow V_{ri} = 1 \quad (۱۴)$$

در این صورت داریم (معادله (۱۵)):

$$\zeta_i = 0.2 \quad (۱۵)$$

اکنون پس از محاسبه هد فشاری پمپ، تمامی موارد لازم جهت محاسبه بازده پمپ در دسترس هستند و این راندمان توسط معادله (۱۶) قابل‌محاسبه است:

$$\eta_P = \frac{\rho g Q H}{P_{in}} \quad (۱۶)$$

در این رابطه P_{in} توان ورودی به پمپ است که در واحد وات قابل توصیف است.

بازده پیشرانشی سامانه جت آب نیز به دو صورت قابل‌محاسبه است: روش اول: استفاده از معادله (۱۷).

$$\eta_v = \frac{T V_S}{\rho g Q H} = \frac{P_T}{P_{in}\eta_P} \quad (۱۷)$$

در رابطه بالا با استفاده از توان ورودی به پمپ، توان پیشرانشی و بازده پمپ می‌توان بازده پیشرانشی را محاسبه نمود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

روش دوم: استفاده از معادله (۱۸) است که به محاسبه بازده پیشرانشی با استفاده از نسبت سرعت جت، بازده نازل، ضریب اتلاف ورودی و نسبت سرعت ورودی می‌پردازد.

$$\eta_v = \frac{2V_{rj}(1-V_{rj})}{\frac{1}{\eta_j} - V_{rj}^2(1-\zeta_i V_{ri}^2)} \quad (۱۸)$$

شایان توجه است که در این رابطه نسبت سرعت جت به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (معادله (۱۹)):

$$V_{rj} = \frac{V_S}{V_o} \quad (۱۹)$$

این نسبت به‌صورت زیر نیز قابل ساده‌سازی است (معادله (۲۰)):

$$V_{rj} = C\frac{V_S}{V_i} \rightarrow V_{rj} = \frac{C}{V_{ri}} \quad (۲۰)$$

همچنین اگر فرض کنیم سرعت آب ورودی به سامانه با سرعت شناور برابر است می‌توان نوشت (معادله (۲۱)):

$$V_{ri} = 1 \rightarrow V_{rj} = C \quad (۲۱)$$

در این صورت رابطه ساده‌سازی شده برای بازده پیشرانشی به شکل زیر خواهد بود (معادله (۲۲)):

$$\eta_v = \frac{2C(1-C)}{\frac{1}{\eta_j} - 0.8C^2} \quad (۲۲)$$

درنهایت برای محاسبه بازده کل سامانه جت آب باید بازده پمپ را در بازده پیشرانشی ضرب نمود (معادله (۲۳)):

$$\eta = \eta_P \eta_v \quad (۲۳)$$

در بعضی موارد برای ساده‌سازی می‌توان بازده کل را به‌صورت زیر نیز بیان نمود (معادله (۲۴)):

$$\eta = \frac{2V_S}{V_i + V_o} \quad (۲۴)$$

رابطه فوق علیرغم سادگی از دقت بسیار پایینی برخوردار است؛ لذا در قسمت طراحی نهایی از آن استفاده نخواهد شد.

شایان توجه است برای استفاده از محاسبات تئوری بالا باید متغیرهای مهمی مانند حداکثر وزن شناور، حداکثر دور پمپ، وزن نهایی دستگاه و قطر پروانه پمپ بر اساس طراحی آماری انتخاب و استخراج گردد. به‌همین منظور در ادامه به معرفی و بررسی داده‌های جمع‌آوری‌شده جهت پیدا نمودن یک الگوریتم و روش حل به کمک طراحی آماری از مشخصات بیش از ۳۰ جت آب تجاری پرداخته می‌شود.

۳- طراحی آماری

در فرایند طراحی آماری، یک تحلیل آماری جامع بر روی‌داده‌های فنی بیش از ۳۰ مدل از معتبرترین برندهای جهانی نظیر آلامارین‌جت[۱]، ام‌جی‌پی[۲]، همیلتون‌جت[۳] و اسکات واترجت[۴]، داده‌های جامعی شامل ابعاد، وزن، توان، مشخصات پمپ و سایر پارامترهای مرتبط گردآوری شد. این داده‌ها در قالب جداول سازمان‌دهی شده و به‌منظور استخراج روابط بین پارامترهای مختلف، تحلیل آماری بر روی آن‌ها انجام پذیرفت.

در تحلیل انجام‌شده، روابط بین پارامترهایی همچون توان نامی دستگاه و وزن آن، حداکثر دور موتور و وزن، و همچنین رابطه بین وزن دستگاه و حداکثر وزن شناور قابل‌حمل موردبررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها به‌صورت نمودارهای پراکندگی و همراه با معادلات رگرسیون ارائه‌شده‌است.

توان نامی و وزن دستگاه: نتایج نشان می‌دهد که اکثر مدل‌های موجود در بازار، وزنی کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم و توانی کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات دارند. رابطه بین این دو پارامتر با یک معادله درجه دو مدل‌سازی شده‌است.

حداکثر دور موتور و وزن دستگاه: با افزایش وزن دستگاه، حداکثر دور موتور آن کاهش می‌یابد. این رابطه با یک منحنی توانی مدل‌سازی شده‌است.

وزن دستگاه و حداکثر وزن شناور قابل‌حمل: بین وزن دستگاه و حداکثر وزن شناوری که می‌تواند حمل کند، رابطه مستقیم وجود دارد. این رابطه با یک خط راست مدل‌سازی شده‌است، اما برای توصیف بهتر پراکندگی داده‌ها، استفاده از یک ناحیه مثلثی پیشنهاد می‌شود.

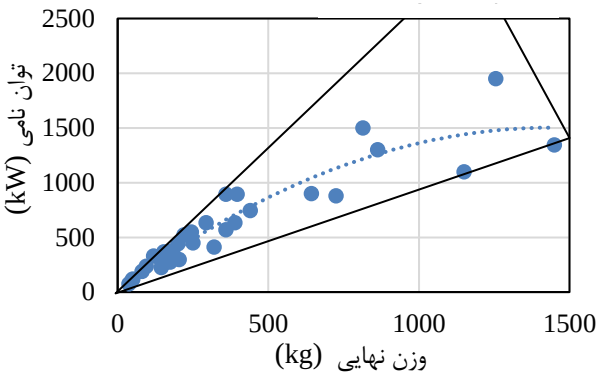
شکل ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب روابط بین توان نامی و وزن، حداکثر دور موتور و وزن، و وزن دستگاه و حداکثر وزن شناور قابل‌حمل را نشان می‌دهند.

شایان‌ذکر است که نتایج این تحلیل آماری، روابط کلی بین پارامترهای مختلف سامانه‌های پیشرانش جت آب را نشان می‌دهد و برای طراحی مفهومی این سامانه‌ها می‌تواند به‌عنوان یک مرجع مفید باشد. بااین‌حال، برای طراحی دقیق یک سامانه خاص، نیاز به بررسی دقیق‌تر مشخصات فنی مدل‌های مختلف و همچنین درنظر گرفتن سایر عوامل مانند نوع کاربرد، شرایط محیطی و محدودیت‌های طراحی است.

---

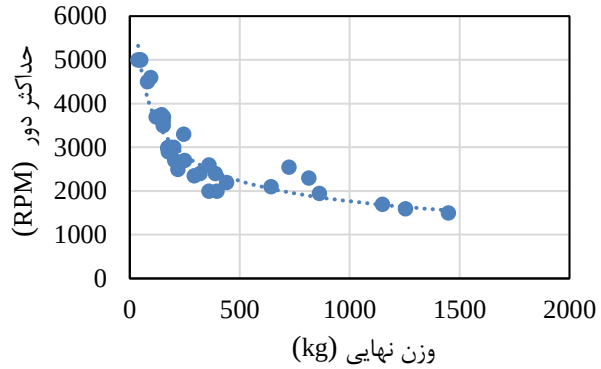
[۱] Alamarin Jet
[۲] MGP
[۳] Hamilton Jet
[۴] Scott Waterjet

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]



شکل ۳: نمودار توان نامی دستگاه برحسب وزن نهایی سامانه.

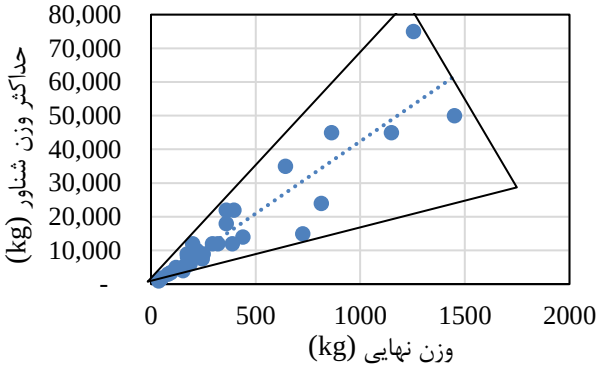
$$P_{in} = -0.0007m_{wj}^2 + 2.0606m_{WJ} + 11.83 \quad (۲۵)$$



شکل ۴: نمودار حداکثر دور موتور دستگاه برحسب وزن نهایی سامانه.

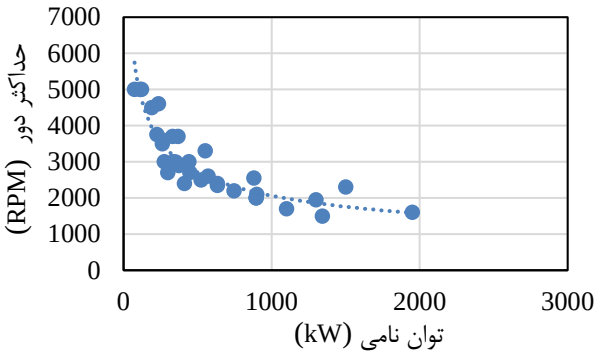
$$m_{S,max} = 42.875m_{WJ} - 503.6 \quad (۲۷)$$

$$n_{max} = 18157m_{wj}^{-0.337} \quad (۲۶)$$



شکل ۵: نمودار حداکثر وزن شناور برحسب وزن نهایی سامانه.

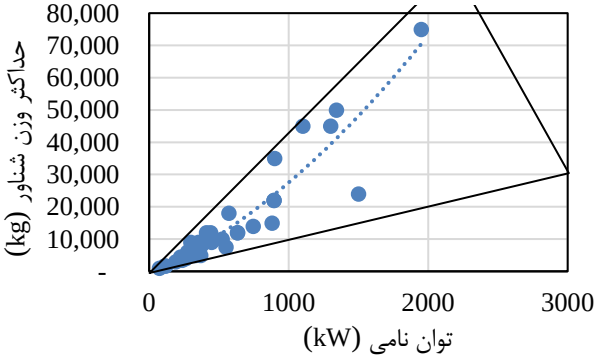
شکل ۶ نمودار حداکثر دور موتور را برحسب توان نامی آن نمایش می‌دهد؛ می‌توان مشاهده نمود که افزایش توان مصرفی پمپ سبب کاهش حداکثر دور موتور قابل‌دستیابی توسط آن خواهد شد. بیشتر مدل‌ها مجهز به پمپی با توان مصرفی کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات و قادر به دستیابی به حداکثر دور موتور ۲۰۰۰ الی ۵۰۰۰ دور در دقیقه هستند. برازش نقاط این نمودار نیز توسط یک منحنی توانی به‌طور مناسبی صورت گرفته است (معادله (۲۸)).



شکل ۶: نمودار حداکثر دور موتور دستگاه برحسب توان نامی آن.

$$n_{max} = 31258P_{in}^{-0.394} \quad (۲۸)$$

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد می‌توان برای به حرکت درآوردن یک شناور تنها از یک سامانه جت آب بهره برد، در این صورت طبق شکل ۷ با افزایش توان نامی آن سامانه وزن شناور قابل‌حمل توسط آن نیز افزایش خواهد یافت به‌طوری‌که در موتورهای کمتر از ۵۰۰ کیلوواتی حداکثر وزن شناور کمتر ۱۵ تن است و با افزایش توان تا ۱۰۰۰ کیلووات می‌توان شناورهایی با وزن حدودی ۳۰ تن را نیز راه‌اندازی کرد. یک تابع درجه دو به‌خوبی قادر به معرفی نقاط طراحی نمودار زیر است (معادله (۲۹)) و یک مثلث محدوده این داده‌ها را معین می‌نماید.

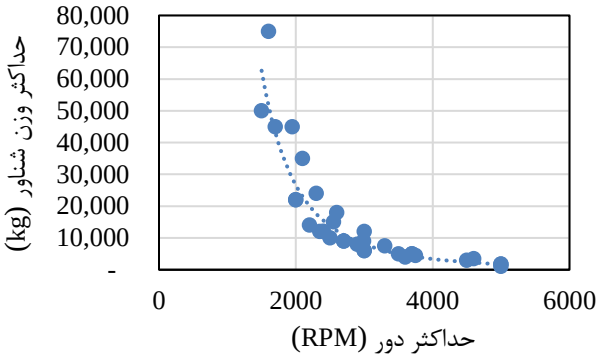


شکل ۷: نمودار حداکثر وزن شناور برحسب توان نامی دستگاه.

$$m_{S,max} = 0.0087P_{in}^2 + 19.617P_{in} - 789.6 \quad (۲۹)$$

در نمودار شکل ۸ می‌توان به‌وضوح دید که افزایش حداکثر دور موتور سبب کاهش شدید حداکثر وزن شناوری است که دستگاه قادر به حمل آن است. اکثر مدل‌ها با حداکثر دور موتور ۲۰۰۰ الی ۵۰۰۰ دور در دقیقه قادر به حمل شناورهایی با وزن کمتر از ۲۰ تن هستند. به‌منظور معادل‌سازی این نقاط با یک تابع از تابع توانی استفاده گردید که به ساده‌ترین و درعین‌حال دقیق‌ترین شیوه آن‌ها را برازش می‌کند (معادله (۳۰)).

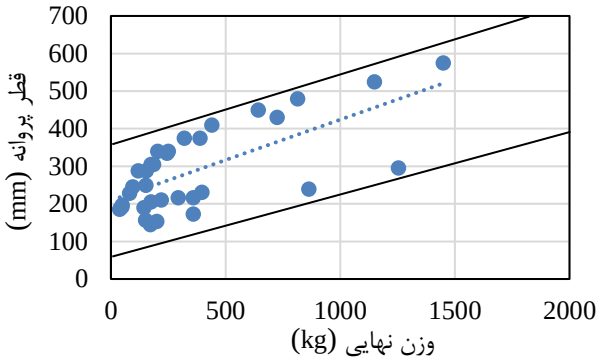
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]



شکل ۸: نمودار حداکثر وزن شناور برحسب حداکثر دور موتور.

$$m_{S,max} = 2 \times 10^{14} n_{max}^{-2.972} \quad (۳۰)$$

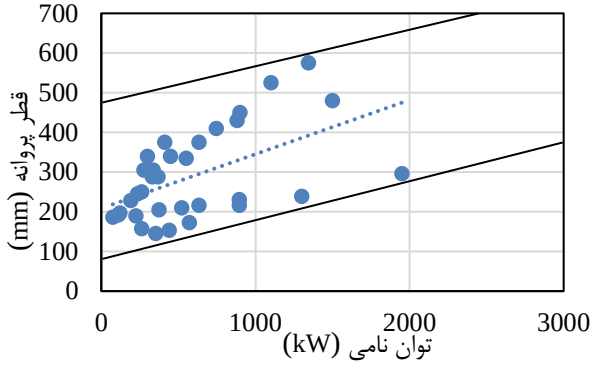
یکی از پارامترهای مهم طراحی قطر پروانه‌های است که بر روی شفت پمپ نصب شده‌است. به‌طورکلی می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود که افزایش وزن کلی دستگاه نشان‌دهنده افزایش قطر پروانه پمپ آن نیز است. اگرچه که رابطه به‌طور دقیق مشخص نیست و در مواردی استثنا مشاهده می‌شود؛ اما می‌توان دید که مقدار قطر پروانه در بازه ۱۰۰ الی ۶۰۰ میلی‌متر تغییر می‌کند و در اکثر مدل‌های سبک‌وزن این بازه بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر است. اگرچه که از تابعی خطی برای برازش نقاط طراحی زیر استفاده گردیده است (معادله (۳۱)) اما شایان توجه است دو خط موازی در بالا و پایین این تابع به بهترین نحو محدوده داده‌ها را مشخص می‌نماید؛ بنابراین می‌توان گفت خط برازش میانگینی از این دو خط است.



شکل ۹: نمودار قطر پروانه برحسب وزن نهایی سامانه.

$$d = 0.215 m_{WJ} + 209.08 \quad (۳۱)$$

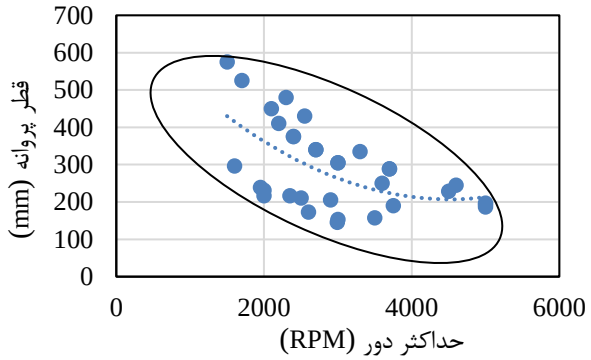
به‌صورت کلی با افزایش توان مصرفی پمپ قطر پروانه شفت متصل به آن نیز افزایش می‌یابد اما با دقت در نمودار شکل ۱۰ می‌توان فهمید که روند مشخصی دراین‌باره قابل‌مشاهده نیست و پخش بودن موارد سبب عدم شکل‌گیری روندی ملموس شده‌اند. به‌هرحال می‌توان به این نتیجه رسید که در دستگاه‌هایی که توان نامی پمپ آن‌ها کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات است، پروانه آن‌ها دارای قطری بین ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌متر است. همانند نمودار پیشین، نمودار زیر نیز نشان‌دهنده یک سطح برای طراحی است که از میان آن منحنی خطی برازش گردیده است (معادله (۳۲)) و توسط دو خط موازی دیگر محدود گردیده است.



شکل ۱۰: نمودار قطر پروانه برحسب توان نامی دستگاه.

$$d = 0.1366 P_{in} + 208.58 \quad (۳۲)$$

تعیین قطر پروانه بر اساس حداکثر دور موتور ازاین‌جهت دشوار است که طبق شکل ۱۱ داده‌های موجود گستردگی مقداری فراوانی دارند با درنظرگیری هر مقداری از دور موتور ابعاد گوناگونی برای قطر پروانه مناسب قابل‌مشاهده است. در این نمودار نیز وجود سطح طراحی بیضوی و منحنی درجه دو که به‌منظور برازش نقاط متوسط آن ترسیم‌شده‌است (معادله (۳۳))، واضح است.

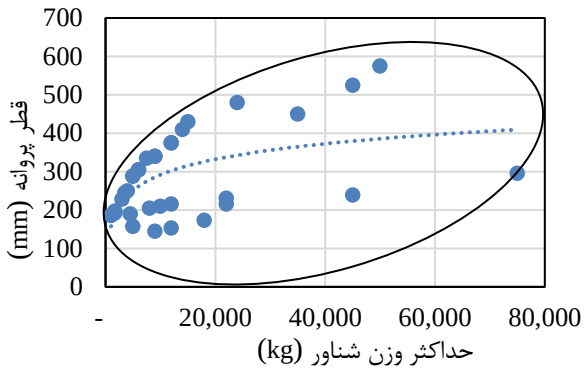


شکل ۱۱: نمودار قطر پروانه برحسب حداکثر دور موتور.

$$d = 2 \times 10^{-5} n_{max}^2 - 0.2206 n_{max} + 705.99 \quad (۳۳)$$

قطر پروانه با توجه به تغییرات حداکثر وزن شناور در نمودار شکل ۱۲ ارزیابی‌شده‌است. اکثر قایق‌های تجاری کوچک و متوسط کمتر از ۲۵ تن وزن‌دارند که در آن‌ها از پروانه‌هایی با قطر ۱۵۰ الی ۵۰۰ میلی‌متر استفاده‌شده‌است. منحنی لگاریتمی زیر بیانگر حد متوسطی از طراحی برای سطح بیضوی طراحی نمودار زیر است (معادله (۳۴))؛ با به پایان رسیدن نمودارهای مرتبط با قطر پروانه می‌توان به این نتیجه رسید که بیان این پارامتر به‌صورت تابعی از تنها یکی از موارد وزن نهایی، توان نامی، حداکثر دور پمپ و حداکثر وزن شناور، مناسب نیست؛ زیرا اهمیت جنس پروانه و مواد پوششی آن، تعداد پروانه‌ها (اغلب بین سه الی پنج عدد)، تعداد مراحل افزایش فشار (معمولاً یک یا دو مرحله)، نوع جریان پمپ (معمولاً محوری یا مختلط) و سایر عوامل غیرقابل‌چشم‌پوشی است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]



شکل ۱۲: نمودار قطر پروانه برحسب حداکثر وزن شناور.

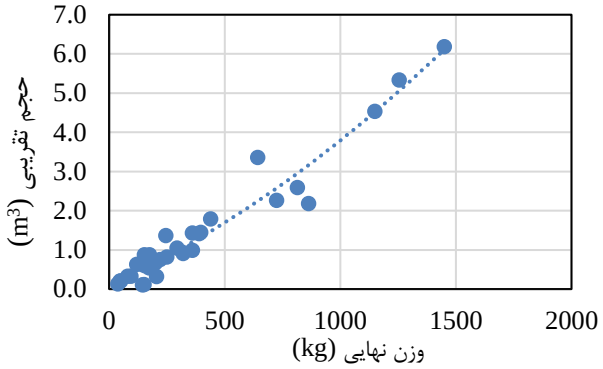
$$d = 58.33Ln(m_{S,max}) - 245.46 \quad (۳۴)$$

حجم حدودی دستگاه فضایی است که مجموعه کلی سامانه پیشرانش اشغال می‌نماید و توسط رابطه زیر قابل‌محاسبه است (معادله (۳۵)):

$$V_{WJ} = abc\ [\mathrm{m}^3] \quad (۳۵)$$

در این رابطه a طول، b عرض و c ارتفاع دستگاه است.

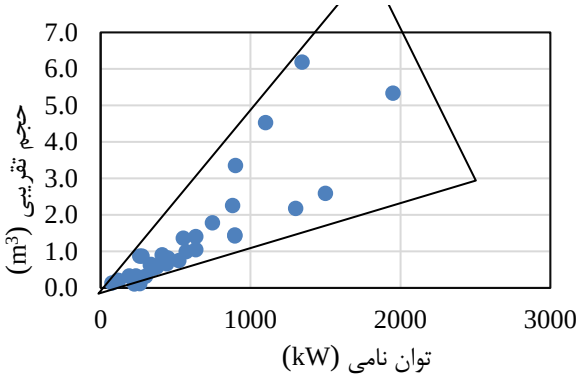
مطابق شکل ۱۳ با افزایش وزن نهایی دستگاه ابعاد آن نیز افزایش‌یافته و درنتیجه حجم تقریبی آن نیز افزایش می‌یابد. در مدل‌های سبک‌وزن (کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم) حجم حدودی دستگاه کمتر از دو مترمکعب است. منحنی درجه دو زیر به‌خوبی متناسب با نقاط طراحی نمودار است (معادله (۳۶)).



شکل ۱۳: نمودار حجم تقریبی دستگاه برحسب وزن نهایی سامانه.

$$V_{WJ} = 10^{-6}m_{wj}^2 + 0.0026m_{WJ} + 0.1159 \quad (۳۶)$$

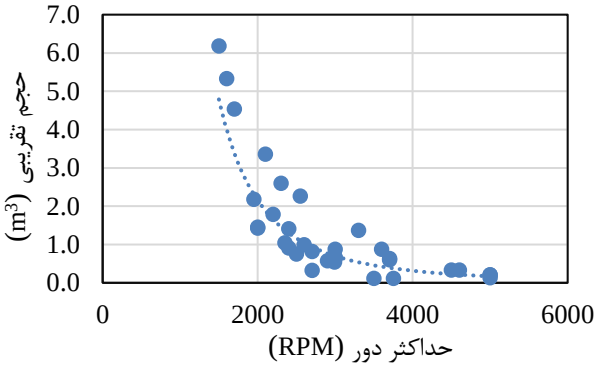
بر اساس شکل ۱۴ افزایش توان پمپ سبب افزایش ابعاد دستگاه و درنتیجه حجم حدودی آن می‌شود؛ عمده نمونه‌ها با توان کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات حجمی کمتر از ۳/۵ مترمکعب دارند. یک خط، مناسب‌ترین و ساده‌ترین تابعی است که نقاط زیر را توصیف می‌نماید (معادله (۳۷)). هرچند عواملی مانند فناوری ساخت سبب پراکندگی تعدادی از نقاط طراحی در توان‌های بالاتر شود؛ یک سطح مثلثی به‌خوبی داده‌ها را محدوده بندی می‌نماید.



شکل ۱۴: نمودار حجم تقریبی دستگاه برحسب توان نامی آن.

$$V_{WJ} = 0.0029P_{in} - 0.3606 \quad (۳۷)$$

نمودار شکل ۱۵ روندی کاهشی را برای حجم دستگاه برحسب حداکثر دور موتور آن بیان می‌نماید به‌طوری‌که با افزایش دور از ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ دور در دقیقه حجم دستگاه از ۲/۵ مترمکعب کاهش یافته‌است و به حدود ۱۰۰ لیتر می‌رسد. منحنی توانی زیر به‌خوبی این نقاط را برازش می‌نماید (معادله (۳۸)).

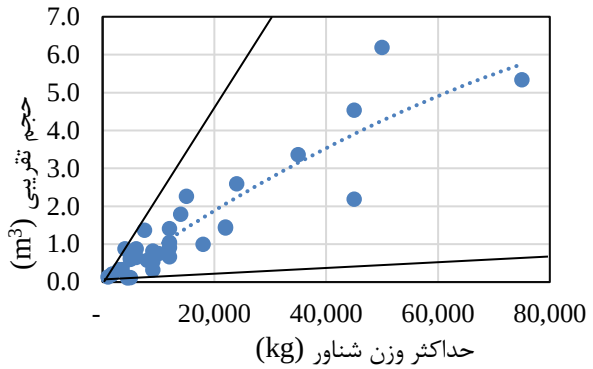


شکل ۱۵: نمودار حجم تقریبی دستگاه برحسب حداکثر دور موتور.

$$V_{WJ} = 3 \times 10^9 n_{max}^{-2.772} \quad (۳۸)$$

حجم تقریبی جت آب و حداکثر وزن شناور رابطه‌ای مستقیم دارند به‌طوری‌که طبق شکل ۱۶ با افزایش وزن شناورهای معمول تا ۲۵ تن حجم دستگاه نیز افزایش‌یافته و به حدود ۲/۵ مترمکعب می‌رسد. منحنی درجه دوم زیر قادر به توصیف اکثر نقاط طراحی است (معادله (۳۹))؛ هرچند توان پمپ و فرایند ساخت دستگاه فارغ از حجم دستگاه، تأثیر به‌سزایی در بیشینه وزن شناور قابل‌استفاده می‌گذارد؛ اما دو خط ترسیم‌شده محدوده مناسبی را برای این داده‌ها می‌سازد.

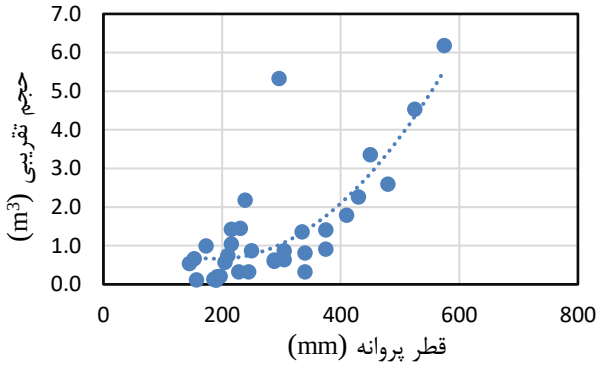
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]



شکل ۱۶: نمودار حجم تقریبی دستگاه برحسب حداکثر وزن شناور.

$$V_{WJ} = -3 \times 10^{-10} m_{S,max}^2 + 0.0001 m_{S,max} - 0.0479 \qquad (۳۹)$$

نمودار شکل ۱۷ از نظم بیشتری برخوردار است و روندی صعودی را برای حجم دستگاه با افزایش قطر پروانه نمایش می‌دهد. بیشتر نمونه‌ها با قطر ۱۵۰ الی ۴۰۰ میلی‌متری حجمی بین ۰/۱ تا ۱/۵ مترمکعب دارند. همان‌طورکه پیش‌ازاین اشاره گردید، بنا به‌دلایلی، تمام نمودارهایی که مرتبط با قطر پروانه هستند بیانگر یک سطح طراحی هستند که تنها توسط یک منحنی قابل توصیف نیست؛ نقاط شکل ۱۷ نیز علیرغم اینکه توسط یک منحنی درجه دو برازش شده‌اند (معادله (۴۰)) سطح پراکندگی غیرخطی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۷: نمودار حجم تقریبی دستگاه برحسب قطر پروانه.

$$V_{WJ} = 3 \times 10^{-5} d^2 - 0.0129 d + 1.8984 \qquad (۴۰)$$

شایان ذکر است که معادلات رگرسیون ارائه شده در این بخش، روابط کلی بین پارامترهای مختلف را نشان می‌دهند و ممکن است به‌دلیل درنظر نگرفتن برخی عوامل مؤثر، دقت کافی را نداشته باشند. پراکندگی داده‌ها در نمودارها (به‌ویژه نمودارهای مربوط به قطر پروانه) نشان می‌دهد که پارامترهای دیگری مانند جنس پروانه، تعداد پره‌ها، نوع جریان پمپ (محوری یا مختلط)، تعداد مراحل افزایش فشار و ... نیز می‌توانند بر روی نتایج تأثیرگذار باشند. در پژوهش‌های آینده، لازم است این پارامترها نیز در محاسبات لحاظ شوند تا دقت نتایج افزایش یابد.

همانطور که مشاهده شد، طراحی مفهومی و طراحی آماری هر دو بر پایه داده‌ها و روابط ریاضی هستند، اما در هدف، روش‌شناسی، دقت و کاربرد با یکدیگر تفاوت دارند. طراحی مفهومی با استفاده از اصول مهندسی و روابط فیزیکی به ارائه یک طرح کلی از سیستم می‌پردازد، در حالی که طراحی آماری با استفاده از روش‌های آماری به تحلیل داده‌ها و استخراج روابط دقیق بین پارامترها می‌پردازد. به‌عبارت دیگر، طراحی مفهومی یک دیدگاه کلی و تخمینی از سیستم ارائه می‌دهد، در حالی که طراحی آماری یک دیدگاه دقیق و کمی از سیستم ارائه می‌دهد.

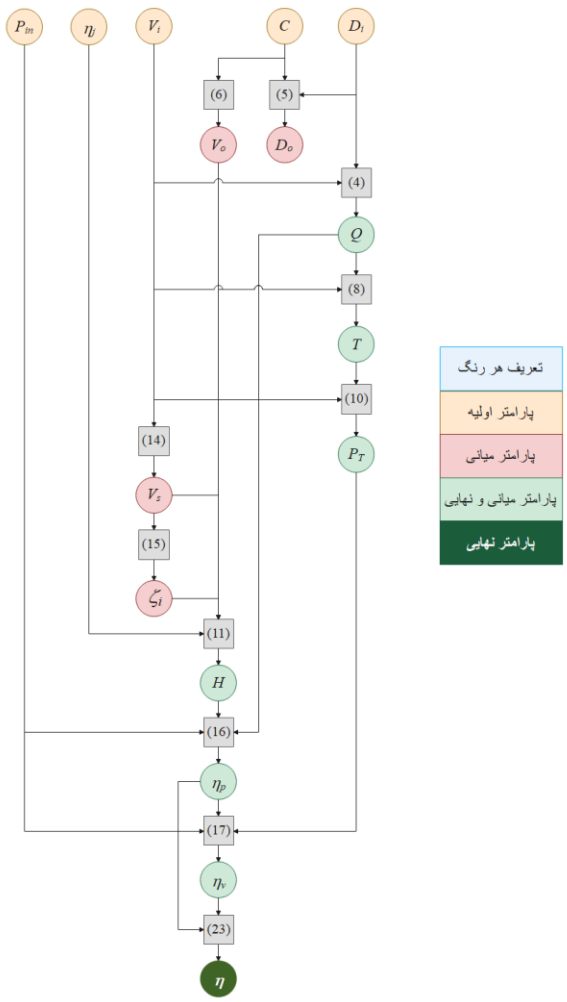
۴- الگوریتم طراحی

در این پژوهش، از دو روش طراحی مکمل استفاده شده‌است: طراحی مفهومی و طراحی آماری. درحالی‌که هر دو روش از داده‌ها و فرمول‌های برازش شده به داده‌ها استفاده می‌کنند، در این بخش به‌منظور بهره‌مندی از منابع طراحی مفهومی و آماری باید الگوریتمی بهینه طراحی‌شده و در راستای تعیین مشخصات عملکردی سامانه جت آب مورداستفاده قرار گیرد. در این الگوریتم دو بخش برای طراحی مفهومی و آماری درنظر گرفته‌شده‌است. در طراحی مفهومی داده‌های ورودی شامل:

- توان مصرفی نامی دستگاه،
- سرعت شناور،
- قطر مجرا ورودی نازل.

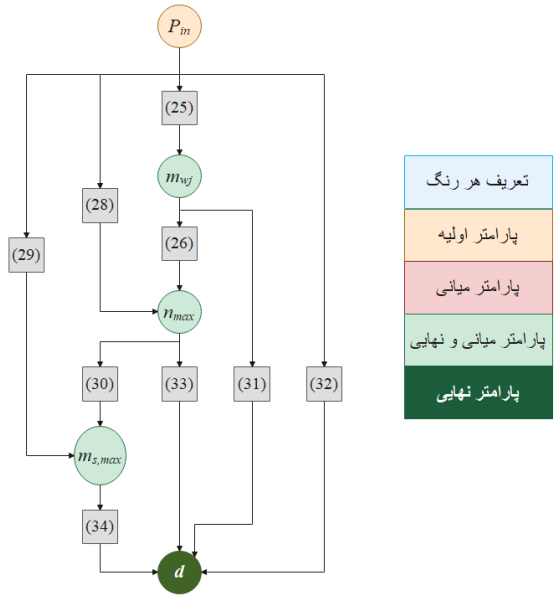
در پژوهش حاضر، انتخاب سه پارامتر مذکور به عنوان ورودی‌های اصلی، با توجه به هدف پژوهش که ارائه یک روش طراحی کلی و ساده برای سامانه‌های پیشرانش جت آب بوده، انجام شده‌است. در صورت نیاز به طراحی دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر، می‌توان از پارامترهای ورودی بیشتری استفاده کرد. همچنین مقادیر عددی بازده نازل و نسبت کاهش نازل با مراجعه به شکل ۱ مفروض می‌گردد. در شکل ۱۸ نمایی از روند الگوریتم طراحی مفهومی قابل‌مشاهده است و نشان می‌دهد هر معادله که با شماره مختص خود نشان داده‌شده‌است، چه ورودی‌هایی دارد و چه پارامترهایی را به‌عنوان خروجی حاصل می‌نماید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]



شکل ۱۸: نمایی از روند طراحی مفهومی سیستم رانش جت آب.

به‌طور مشابه با درنظر گرفتن توان ورودی دستگاه، فرایند طراحی الگوریتم مربوط به طراحی آماری آغاز می‌گردد. در شکل ۱۹ روند الگوریتم طراحی آماری قابل‌مشاهده است. شایان توجه است که برای محاسبه پارامترهای حداکثر دور موتور دو روش، حداکثر وزن شناور دو روش و قطر پروانه چهار روش قابل‌استفاده است.



شکل ۱۹: روند نمای طراحی آماری.

۴-۱- بررسی الگوریتم پیشنهادی

در ادامه این بخش تلاش می‌کنیم با استفاده از الگوریتم‌های معرفی‌شده اقدام به طراحی سه دستگاه جت آب نموده؛ مشخصات ورودی این سه دستگاه در جدول ۱ مشخص گردیده است.

جدول ۱: مشخصات ورودی سه سامانه جت آب.

مشخصه ورودی	مورد یک	مورد دو	مورد سه
توان عملیاتی $[kW]$	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰
سرعت آب ورودی $[m/s]$	۱۰	۱۰	۱۰
قطر مجرا ورودی نازل $[mm]$	۲۰۰	۱۸۰	۳۵۰
بازده نازل $[\%]$	۹۳	۹۴	۹۵
نسبت کاهش نازل	۰/۴	۰/۲	۰/۳

اکنون به محاسبه پارامترهای طراحی برای سه مدل جت آب می‌پردازیم. نتایج طراحی در جدول ۲ قابل‌مشاهده است:

جدول ۲: نتایج حاصل از طراحی سه دستگاه جت آب به کمک الگوریتم‌های طراحی مفهومی و آماری.

مشخصه	مقدار برای مورد اول	مقدار برای مورد دوم	مقدار برای مورد سوم
سرعت آب خروجی $[m/s]$	۲۵	۵۰	۳۳/۳
دبی حجمی آب $[L/s]$	۳۱۴/۱۶	۲۵۴/۴۷	۹۶۲/۱۱
قطر مجرا خروجی نازل [mm]	۱۲۶	۸۰	۱۹۲
نیروی پیشرانشی [kN]	۴/۸۸	۱۰/۵۵	۲۳/۲۶
توان پیشرانشی [kW]	۴۸/۸۲	۱۰۵/۴۵	۲۳۲/۵۸
هد [m]	۳۰/۱۸	۱۳۱/۴۸	۵۵/۵۳
بازده پمپ [%]	۳۸/۵۴	۶۸/۰۱	۵۴/۳۰
بازده پیشرانشی [%]	۵۰/۶۷	۳۱/۰۱	۴۲/۸۳
بازده کل [%]	۱۹/۵۳	۲۱/۰۹	۲۳/۲۶
وزن نهایی دستگاه [kg]	۱۲۰	۲۶۰	۶۰۰
حداکثر دور [RPM]	۳۵۵۰	۲۷۰۰	۲۰۵۰
حداکثر وزن شناور [kg]	۴۶۶۰	۱۱۲۰۰	۲۷۵۳۰
قطر پروانه [mm]	۲۴۳	۲۷۷	۳۴۵

۴-۲- مقایسه و بررسی نتایج الگوریتم طراحی با نتایج واقعی

پس از طراحی سه دستگاه سامانه جت آب بر مبنای الگوریتم طراحی آماری، باید نتایج حاصل را با مشخصات سه دستگاه جت آب واقعی مقایسه نماییم؛ به این منظور از کاتالوگ‌هایی که در بخش طراحی آماری مورداستفاده قراردادیم کمک گرفته و سه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

مورد دستگاه جت آب با توان‌های عملیاتی نزدیک به موارد طراحی‌شده را بررسی می‌نماییم. مشخصات این سه دستگاه در جدول ۳ قابل‌مشاهده است.

جدول ۳: نتایج حاصل از بررسی کاتالوگ‌های سه دستگاه جت آب.

مشخصه	جت آب اول	جت آب دوم	جت آب سوم
کمپانی سازنده	**Alamarin-Jet**	**Scott Waterjet**	**MJP**
مدل	AJ245	149	525
کشور سازنده	فنلاند	نیوزیلند	سوئد
وزن نهایی [kg]	۹۵	۲۲۰	۱۱۵۰
توان نامی [kW]	۲۳۵	۵۲۲	۱۱۰۰
حداکثر دور موتور [RPM]	۴۶۰۰	۲۵۰۰	۱۷۰۰
حداکثر وزن شناور دارای یک جت آب [kg]	۳۵۰۰	۱۰۰۰۰	۴۵۰۰۰
قطر پروانه [mm]	۲۴۵	۲۱۰	۵۲۵

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از الگوریتم با داده‌های واقعی (جدول ۳) اختلافاتی دارند. این اختلافات می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله محدود بودن پارامترهای ورودی، خطای ناشی از برازش منحنی‌ها و درنظر نگرفتن برخی پارامترهای مؤثر در طراحی باشد. برای بهبود دقت نتایج، لازم است در پژوهش‌های آینده، پارامترهای بیشتری در محاسبات لحاظ شوند و از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌تر استفاده شود.

اکنون با استفاده از معادله (۴۱)، درصد خطای نتایج طراحی آماری را با نتایج واقعی می‌سنجیم.

$$\%\text{Error} = \frac{\left|x_{\text{Theoretical}} - x_{\text{Experimental}}\right|}{x_{\text{Experimental}}} \times 100 \qquad (۴۱)$$

در جدول ۴ درصد خطا برای پارامترهای مختلف سه مورد جت آب قابل‌مشاهده است.

جدول ۴: درصد خطای پارامترهای طراحی آماری و نتایج واقعی.

مشخصه	درصد خطای جت آب اول	درصد خطای جت آب دوم	درصد خطای جت آب سوم
وزن نهایی [kg]	۲۶/۳	۱۸/۲	۴۷/۸
توان نامی [kW]	۶/۴	۴/۲	۹/۱
حداکثر دور موتور [RPM]	۲۲/۸	۸/۰	۲۰/۶
حداکثر وزن شناور دارای یک جت آب [kg]	۳۳/۱	۱۲/۰	۳۸/۸
قطر پروانه [mm]	۰/۸	۳۱/۹	۳۴/۳

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در برخی موارد درصد خطای بسیار بالایی وجود دارد. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم طراحی ارائه شده هنوز نیاز به بهبود دارد. یکی از دلایل اصلی این خطاها، محدود بودن پارامترهای ورودی درنظر گرفته شده در محاسبات است. به عنوان مثال، در محاسبه وزن نهایی، تنها از معادله ۲۵ استفاده شده‌است که بر اساس شکل ۳ و توضیحات ارائه شده، نمی‌تواند به تنهایی معرف داده‌های موجود باشد. و بسیاری از داده‌های آماری در سطح طراحی مثلثی شکل قرار داشتند و علت آن را می‌توان به شیوه‌های طراحی و تولید متفاوت و به‌کارگیری مواد سازنده گوناگون که تأثیر مستقیمی بر روی وزن نهایی دستگاه دارد، دانست. توان نامی دستگاه داده اولیه و فرضی بوده که تلاش شد مقادیر واقعی نزدیک به آن با تغییرات بازه کمتر از ۱۰٪ از میان کاتالوگ‌ها انتخاب گردد. محاسبه حداکثر دور موتور توسط معادله (۲۸) صورت پذیرفت و شکل ۶ نشان‌دهنده انطباق بالای این معادله با داده‌های آماری است؛ هرچند باوجود انطباق بالا، پراکندگی داده‌ها سبب ایجاد خطای حدود ۱۰ درصد برای توان متوسط و بالای ۲۰ درصد برای توان بالا و پایین شده‌است. حداکثر وزن شناور در صورت به‌کارگیری یک دستگاه جت آب در آن توسط معادله (۲۹) محاسبه گردید و شکل ۷ نشان‌دهنده شیوه پراکندگی داده‌های تجربی است؛ لذا مشخص است که قرارگیری داده‌های آماری در مثلث طراحی می‌تواند سبب ایجاد خطای بالای ۳۰ درصد در صورت استفاده از معادله منحنی برازنده داده‌ها شود. پارامترهای مختلفی در کنار توان نامی جت آب بر حداکثر وزن شناور دخیل است، مانند فناوری ساخت جت آب، تعداد مراحل و تعداد پره‌های واحد پمپ آن. برای محاسبه قطر پروانه از معادله (۳۲) استفاده می‌گردد که بر مبنای شکل ۱۰ برازش شده‌است؛ همان‌طور که واضح است این شکل برای نقاط طراحی تجربی محدوده‌ای بین دو خط موازی درنظر گرفته است که معادله (۳۲) نقطه وسط آن است، لذا داده‌های محاسبه‌شده توسط این معادله می‌تواند بدون خطا (مورد اول) یا با خطای بالای ۳۰ درصد (موارد دوم و سوم) باشد. علل چنین خطاهایی در فرایند، فناوری و مواد به‌کاررفته در ساخت پروانه‌ها نهفته است که تأثیر مستقیم و گاه زیادی بر ابعاد پروانه دارد.

علاوه بر این، پارامترهای دیگری مانند جنس پروانه، تعداد پره‌ها، نوع جریان پمپ، تعداد مراحل افزایش فشار و ... نیز می‌توانند بر روی نتایج تأثیرگذار باشند که در این پژوهش درنظر گرفته نشده‌اند. در پژوهش‌های آینده، لازم است این پارامترها نیز در محاسبات لحاظ شوند تا دقت نتایج افزایش یابد. در ادامه مراحلی که به‌منظور طراحی پارامترهای عملکردی یک دستگاه جت آب با توان نامی ۵۰۰ کیلووات طی می‌شود، بررسی می‌گردد.

۴-۳- طراحی جت آب با توان ۵۰۰ کیلووات

بر اساس روند طی شده جهت محاسبه و تکمیل نتایج ابتدا فرضیات زیر را بر اساس نیاز که در جدول ۵ نشان داده‌شده‌است درنظر می‌گیریم و بر اساس طراحی مفهومی و آماری صورت گرفته برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

یک جت آب کاربردی با مشخصات عملکردی زیر روند طراحی را پیش می‌بریم.

جدول ۵: مشخصات عملکردی جت آب موردنظر در طراحی.

مشخصه	مقدار
توان عملیاتی	۵۰۰[kW]
سرعت شناور	۱۰[m/s]
قطر مجرا ورودی نازل	۲۰۰[mm]
بازده نازل	۹۴[%]
نسبت کاهش نازل	۰/۲

با استفاده از روابط ریاضی معرفی‌شده در قسمت طراحی مفهومی، اقدام به محاسبه بخشی از مشخصات عملکردی سامانه پیشرانش می‌نماییم. در ابتدا به کمک معادله (۴) دبی حجمی آب محاسبه می‌گردد که داده میانی و نهایی است، به این معنا که علاوه بر اینکه در محاسبه پارامترهای دیگر کاربرد دارد، به‌عنوان یکی از مشخصات عملکردی سامانه نیز ثبت می‌گردد. به کمک معادلات (۵) و (۶) می‌توان قطر مجرا خروجی نازل و سرعت سیال خروجی از آن را محاسبه نمود. به کمک معادلات (۸) و (۱۰) نیروی پیشرانشی و توان آن (داده‌های میانی و نهایی) محاسبه می‌گردد. هد دستگاه نیز توسط معادله (۱۱) به‌عنوان داده‌ای میانی و نهایی حاصل می‌گردد. دو بازده پمپ و پیشرانش (داده‌های میانی و نهایی) توسط معادلات (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردند. درنهایت معادله (۲۳) بازده کل سامانه را به‌عنوان داده نهایی محاسبه می‌نماید. نتایج این محاسبات در جدول ۶ قابل‌مشاهده است.

جدول ۶: نتایج حاصل از طراحی مفهومی.

مشخصه	مقدار
سرعت آب خروجی [m/sec]	۵۰
دبی حجمی آب [L/sec]	۳۱۴/۱۶
قطر مجرا خروجی نازل [mm]	۸۹
نیروی پیشرانشی [kN]	۱۳/۰۲
توان پیشرانشی [kW]	۱۳۰/۱۹
هد [m]	۱۳۱/۴۷
بازده پمپ [%]	۸۳/۹۵
بازده پیشرانشی [%]	۳۱/۰۱
بازده کل [%]	۲۶/۰۳

با بررسی نمودارهای مربوط به طراحی آماری مشخصات عملکردی طبق جدول ۷ حاصل می‌گردد. شایان توجه است که بنا به دلایلی که پیش‌تر توضیح داده شد، در این جدول برای هر مشخصه سه مقدار لحاظ گردیده است که شامل مقادیر زیر است:

- مقدار کمینه سطح طراحی آماری،
- مقدار محاسبه‌شده توسط معادله برازنده،
- مقدار بیشینه سطح طراحی آماری.

جدول ۷: نتایج حاصل از طراحی آماری.

مشخصه	مقدار		
	بیشینه	معادله برازنده	کمینه
وزن نهایی دستگاه [kg]	۵۰۰	۲۶۰	۲۰۰
حداکثر دور [RPM]	-	۲۷۰۰	-
حداکثر وزن شناور [kg]	۲۰۰۰۰	۱۱۲۰۰	۷۰۰۰
قطر پروانه [mm]	۴۶۰	۲۷۷	۱۱۰

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف تسهیل فرایند طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب، دو الگوریتم طراحی، شامل طراحی مفهومی و طراحی آماری، ارائه شده‌است. این الگوریتم‌ها با استفاده از داده‌های تجربی موجود و تحلیل آماری گسترده توسعه یافته‌اند. به منظور ارزیابی کارایی این الگوریتم‌ها، نتایج حاصل از آن‌ها با داده‌های واقعی سه نمونه سامانه پیشرانش جت آب مقایسه شده‌است. همچنین، به منظور نشان دادن کاربرد عملی الگوریتم‌ها، یک سامانه پیشرانش جت آب با توان ۵۰۰ کیلووات به‌عنوان نمونه طراحی شده‌است.

نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- **طراحی ترکیبی:** برای طراحی کامل یک سامانه پیشرانش جت آب، استفاده از ترکیبی از روش‌های تحلیلی (استفاده از فرمول‌های ریاضی) و روش‌های مبتنی بر داده (استفاده از داده‌های تجربی و تحلیل آماری) ضروری است.
- **پویایی داده‌ها:** داده‌های آماری با گذشت زمان و پیشرفت فناوری تغییر می‌کنند. با این حال، روندهای کلی و روابط بین پارامترها معمولاً ثابت می‌مانند و می‌توان از آن‌ها برای تخمین اولیه پارامترها استفاده کرد.
- **کارایی روش طراحی مفهومی:** روش طراحی مفهومی ارائه شده در این پژوهش، ابزاری کارآمد برای طراحی مفهومی و کاهش زمان طراحی سامانه‌های پیچیده مانند سامانه‌های پیشرانش جت آب است. این روش با ارائه یک چارچوب فکری و عملیاتی، به طراحان کمک می‌کند تا به تخمین اولیه پارامترهای طراحی دست یابند.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش طراحی ترکیبی ارائه شده، روشی دقیق و کارآمد برای طراحی مفهومی سامانه‌های پیشرانش جت آب است. این روش می‌تواند در صنایع دریایی برای کاهش زمان و هزینه طراحی و افزایش دقت طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از نکات مهم در این پژوهش، استفاده از ترکیب دو روش طراحی مفهومی و طراحی آماری است. این ترکیب به طراحان کمک می‌کند تا در ابتدا یک طرح کلی از سیستم را با استفاده از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

روش طراحی مفهومی ایجاد کنند و سپس با استفاده از روش طراحی آماری، به تحلیل دقیق‌تر داده‌ها و بهبود طراحی سیستم بپردازند.

در این پژوهش، از یک روش سنتی‌تر برای طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب استفاده شده‌است که شامل جمع‌آوری داده‌های تجربی، تحلیل آماری و استخراج روابط بین پارامترها به صورت فرمول‌های ریاضی است. این روش دارای مزایایی از جمله سادگی، دقت قابل قبول و نیاز به داده کمتر است. با این حال، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری عمیق نیز می‌تواند در این زمینه مفید باشد و در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

محدودیت‌های پژوهش

محدودیت‌های پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- در این پژوهش، به‌دلیل محدودیت‌های موجود، تنها به بررسی چند پارامتر کلیدی در طراحی سامانه‌های پیشرانش جت آب پرداخته شده‌است. در پژوهش‌های آینده، لازم است پارامترهای بیشتری مانند جنس پروانه، تعداد پره‌ها، نوع جریان پمپ، تعداد مراحل افزایش فشار و ... در محاسبات لحاظ شوند.
- داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، از کاتالوگ‌های موجود جمع‌آوری شده‌است و ممکن است دقت کافی را نداشته باشند. در پژوهش‌های آینده، لازم است از داده‌های تجربی دقیق‌تر و یا شبیه‌سازی‌های CFD برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های پیشرانش جت آب استفاده شود.
- روش‌های تحلیل آماری مورد استفاده در این پژوهش، ممکن است دقت کافی را برای توصیف پراکندگی داده‌ها نداشته باشند. در پژوهش‌های آینده، لازم است از روش‌های تحلیل آماری پیشرفته‌تر استفاده شود.

۶- پیشنهاد ادامه پژوهش

ازآنجایی‌که داده‌های مورداستفاده در این پژوهش ممکن است با پیشرفت فناوری تغییر کنند، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های توسعه‌یافته به‌طور دوره‌ای به‌روزرسانی شوند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای طراحان سامانه‌های پیشرانش جت آب در صنایع دریایی مورداستفاده قرار گیرد.

منابع مالی: منابع مالی استفاده‌شده برای این تحقیق از محل تسهیلات مالی پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست دانشگاه تهران تأمین‌شده‌است.

۷- مراجع

[1] A. Menon, "No Title," *Naval Architecture*, 2021. https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-water-jet-propulsion-working-principle-design-and-advantages/ (accessed Oct. 12, 2021).

[2] Tony Buttler, *Jet Prototypes of World War II: Gloster, Heinkel, and Caproni Campini's wartime jet programmes*. Osprey Publishing.

[3] G. Alegi, "Secondo's Slow Burner, Campini Caproni and the C.C.2," *Aviat. Hist.*, no. 6, p. 76.

[4] River King, "No Title," *New Zealand narrative*. https://www.nzedge.com/legends/bill-hamilton/ (accessed Mar. 11, 2021).

[5] R. HATTE and H. J. DAVIS, "Selection of Hydrofoil Waterjet Propulsion Systems," *J. Hydronautics*, vol. 1, no. 1, pp. 12–22, Jan. 1967, doi: 10.2514/3.62747.

[6] L. ARCAND and C. R. COMOLLI, "Optimization of Waterjet Propulsion for High-Speed Ships," *J. Hydronautics*, vol. 2, no. 1, pp. 2–8, Jan. 1968, doi: 10.2514/3.62766.

[7] J. H. Brandau, "Performance of Waterjet Propulsion Systems- A Review of the State-of-the-Art," *J. Hydronautics*, vol. 2, pp. 61–73, 1968, [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110077348

[8] N. Fujisawa, "Measurements of Basic Performances for Waterjet Propulsion Systems in Water Tunnel," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2, no. 1, pp. 43–50, 1995, doi: 10.1155/S1023621X95000194.

[9] H. W. Oh, E. S. Yoon, K. S. Kim, and J. W. Ahn, "A practical approach to the hydraulic design and performance analysis of a mixed-flow pump for marine waterjet propulsion," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 217, no. 6, pp. 659–664, Sep. 2003, doi: 10.1177/095765090321700610.

[10] N. W. H. Bulten, "A breakthrough in waterjet propulsion systems," *Doha Int. Marit. Def. Exhib. Conf.*, no. March, pp. 2–7, 2008, [Online]. Available: http://www.rusiqatar.org/attach/7B_SHIP DESIGN & MAINTENANCE - NORBERT BULTEN.pdf

[11] M.-C. Kim, H.-H. Chun, H. Y. Kim, W. K. Park, and U. H. Jung, "Comparison of waterjet performance in tracked vehicles by impeller diameter," *Ocean Eng.*, vol. 36, no. 17, pp. 1438–1445, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.07.017.

[12] D. Bonaiuti, M. Zangeneh, R. Aartojarvi, and J. Eriksson, "Parametric Design of a Waterjet Pump by Means of Inverse Design, CFD Calculations and Experimental Analyses," *J. Fluids Eng.*, vol. 132, no. 3, Mar. 2010, doi: 10.1115/1.4001005.

[13] Y. Deng, P. Zou, X. Kang, and Y. Wang, "Experimental Investigations on Non-premixed Methane-air Flames in Radial Microchannels with a Controlled Temperature Profile," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 194, no. 16, pp. 3318–3339, 2022, doi: 10.1080/00102202.2021.1925660.

[14] S. Guo, J. Du, X. Ye, R. Yan, and H. Gao, "The computational design of a water jet propulsion spherical underwater vehicle," in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]

Automation, 2011, pp. 2375–2379. doi: 10.1109/ICMA.2011.5986358.

[15] C. Yue, S. Guo, X. Lin, and J. Du, "Analysis and improvement of the water-jet propulsion system of a spherical underwater robot," in *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2012, pp. 2208–2213. doi: 10.1109/ICMA.2012.6285686.

[16] M. Altosole, G. Benvenuto, M. Figari, and U. Campora, "Dimensionless numerical approaches for the performance prediction of marine waterjet propulsion units," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2012, no. i, 2012, doi: 10.1155/2012/321306.

[17] M. Kandasamy *et al.*, "Simulation based design optimization of waterjet propelled Delft catamaran," *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 60, pp. 277–308, 2013, doi: 10.3233/ISP-130098.

[18] P. Ghadimi, R. Shademani, and M. Y. Fard, "Performance assessment of the waterjet propulsion system through a combined analytical and numerical approach," *Int. J. Phys.*, vol. 1, no. 2, pp. 22–27, 2013, doi: 10.12691/ijp-1-2-1.

[19] Y. Ni, W. Liu, Z. Shen, and X. Pan, "Thrust characteristics and nozzle role of water jet propulsion," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 47–53, 2017, doi: 10.5293/IJFMS.2017.10.1.047.

[20] J. Gong, C. Guo, C. Wang, T. Wu, and K. Song, "Analysis of waterjet-hull interaction and its impact on the propulsion performance of a four-waterjet-propelled ship," *Ocean Eng.*, vol. 180, pp. 211–222, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.002.

[21] R. Huang, Y. Dai, X. Luo, Y. Wang, and C. Huang, "Multi-objective optimization of the flush-type intake duct for a waterjet propulsion system," *Ocean Eng.*, vol. 187, p. 106172, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106172.

[22] C. Wang *et al.*, "Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Nozzle in Waterjet Propulsion System," *Processes*, vol. 7, no. 12, 2019, doi: 10.3390/pr7120915.

[23] W. Jiao, L. Cheng, D. Zhang, B. Zhang, Y. Su, and C. Wang, "Optimal Design of Inlet Passage for Waterjet Propulsion System Based on Flow and Geometric Parameters," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2019, no. 1, p. 2320981, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.1155/2019/2320981.

[24] L. Zhang, J. N. Zhang, Y. C. Shang, G. X. Dong, and W. M. Chen, "A Practical approach to the assessment of waterjet propulsion performance: The case of a waterjet-propelled trimaran," *Polish Marit. Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 27–38, 2020, doi: 10.2478/pomr-2019-0063.

[25] I. Pinheiro De Araújo Costa and F. S. Gomes, "Comparative analysis between waterjet and conventional propulsion: A new possibility for use in Brazilian Navy Ships," *ICPR-Americas 20230 - Gen. Sess.*, pp. 1–14, 2020.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-07]