http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۴ آبان ۱۳۹۱ ص ص ۸۰-۹۰

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۱۲/۲۷
پذیرش ۹۱/۴/۵
ارائه در سایت ۹۱/۶/۳۰

بهینه‌سازی هیدرودینامیکی فرم هندسی بدنه شناور تندرو پلنینگ با زاویه ددرایز متغیر به کمک الگوریتم ژنتیک

عباس وفایی‌صفت[۱]، محمدسعید سیف[۲*]، محمد توکلی دخرآبادی[۳]

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵، seif@sharif.ir

چکیده- در اکثر روش‌ها و از جمله روش نیمه‌تجربی سویتسکی، برای محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی شناور تندرو، زاویه ددرایز ثابت فرض می‌شود و یا زاویه ددرایز مقطع عرضی واقع در مرکز گرانش شناور مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس، با ثابت درنظر گرفتن زاویه ددرایز، فیزیک واقعی مسئله مدل نشده است، زیرا در واقعیت زاویه ددرایز شناور تندرو در طول بدنه متغیر می‌باشد. در این مقاله، ابتدا مقاومت هیدرودینامیکی به وزن شناور تندرو با زاویه ددرایز متغیر با توسعه روش نیمه‌تجربی سویتسکی محاسبه می‌شود و نشان داده می‌شود که نتایج حاصل از روش ارائه‌شده از دقت بیشتری نسبت به روش نیمه‌تجربی سویتسکی در مقایسه با نتایج تجربی برخوردار می‌باشد و مطابقت مناسبی با نتایج تجربی دارد. سپس به کمک روش الگوریتم ژنتیک به تعیین بهینه مقدار طول مرکز گرانش از ترنزام، عرض و نرخ تغییر زاویه ددرایز از ترنزام تا سینه شناور تندرو پرداخته شده است. مقاومت به وزن تعیین‌شده در بخش اول به عنوان تابع هدف جهت کمینه‌شدن مقاومت بدنه و پایداری هیدرواستاتیکی و پایداری دینامیکی طولی و عرضی به عنوان قیود بهینه‌سازی درنظر گرفته شده است. در نهایت دسته جواب‌های بهینه برای استفاده طراحان در مرحله طراحی مفهومی ارائه شده است.

کلیدواژگان: شناور تندرو، زاویه ددرایز متغیر، مقاومت هیدرودینامیکی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک

Hull form hydrodynamic optimization of high speed planning craft with variable deadrise angle by using genetic algorithm

A. Vafaeesefat[1], M. S. Seif[2*], M. Tavakoli Dakhrabadi[3]

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran
2- Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
3- PhD Student, Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P. O. B. 11365-9567 Tehran, seif@sharif.ir

Abstract- To calculate the hydrodynamic resistance of high speed craft, traditional methods such as Savitsky's semi-experimental method assumed the deadrise angle is constant or they used the constant deadrise angle in the cross section of gravity center. In fact, the deadrise angle of high speed craft is variable in longitudinal direction of hull. Therefore, the real deadrise angle is not considered in the previous models. In this paper, hydrodynamic resistance per weight is calculated by extending Savitsky's semi-experimental method. The results show that the present method is more accurate than results of Savitsky's semi experimental method when they are compared with empirical results. In addition, results of present method are good agreement with the empirical results over a wide range of volumetric Froude numbers. Then, optimum effective parameters such as distance of center of gravity to transom, beam and rate of deadrise angle variation are determined by using genetic algorithm method. Resistance per weight is considered as an objective function. Dynamic and static stability are taken as constraints of optimization. The dynamic stability includes the transverse dynamic stability and porpoising. Finally, a set of optimum parameters are presented for use by naval architects in the concept design of the monohull high-speed craft.

Keywords: High Speed Craft, Variable Deadrise Angle, Hydrodynamic Resistance, Optimization, Genetic Algorithm

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

۱- مقدمه

با افزایش علاقه و نیاز بشر به داشتن شناورهای سریع‌تر، در دهه‌های اخیر شناورهای تندرو مختلفی معرفی شده‌اند که هر یک از آن‌ها دارای معایب و مزایای مربوط به خود می‌باشند. شناور تندرو پلنینگ به شناوری اطلاق می‌شود که بدون استفاده از هیچ وسیله اضافی غیر از شکل بدنه بتواند با استفاده از لیفت هیدرودینامیکی از آب خارج شده و منجر به کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور گردد. چنانچه بدنه شناور به طور مناسبی طراحی شده باشد، با افزایش سرعت شناور، نیروهای هیدرودینامیکی افزایش می‌یابند و سبب خارج‌شدن قسمتی از شناور از آب می‌گردند. این امر موجب کاهش سطح خیس شده و در نتیجه کاهش مقاومت اصطکاکی می‌گردد.

تاکنون برای تعیین مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است. به طور کلی برای محاسبه مقاومت این شناورها دو راه وجود دارد. روش اول استفاده از راه حل‌های دینامیک سیالات محاسباتی[1] می‌باشد. در روش دوم از روابط تجربی و هندسی، که از داده‌های آزمایشگاهی قابل استخراج می‌باشد، بهره برده می‌شود.

از فعالیت‌ها و پژوهش‌هایی که تاکنون به کمک روش اول در این زمینه انجام شده است، می‌توان به پژوهش پناهی و همکارانش اشاره نمود که حرکات یک شناور تندرو کاتاماران را در فضای سه‌بعدی با شش درجه آزادی با استفاده از روش حجم محدود[2] شبیه‌سازی کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی مقایسه نموده‌اند[۱]. ساهو و همکارانش مقاومت موج یک کاتاماران را به روش عددی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه نموده‌اند[۲].

قاسمی و غیاثی نیز یک روش ترکیبی برای تعیین مشخصه های هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ ارائه نمودند[۳]. در این پژوهش، با استفاده از روش اجزاء مرزی[3] و تئوری لایه مرزی به تعیین مقاومت‌های هیدرودینامیکی شناور پلنینگ پرداخته شده است. کهنسال و قاسمی یک مدل عددی برای مشخصه‌های هیدرودینامیکی فرم‌های گوناگون از بدنه شناور پلنینگ ارائه کردند[۴]. در این پژوهش نیز از اجزاء مرزی و تئوری لایه مرزی برای تعیین مقاومت‌های هیدرودینامیکی شناور پلنینگ استفاده شده است و تحلیل عددی ارائه‌شده را با داده‌های تجربی شناور پلنینگ با زاویه ددرایز[4] متغیر مقایسه کرده‌اند که از تطابق خوبی برخوردار بوده است.

بریزولارا دقت کدهای CFD را در تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ مطالعه نمود[۵]. روش‌های CFD از دقت خوبی در نتایج برخوردار می‌باشند، اما این روش‌ها زمان حل نسبتا طولانی دارند و مدل‌سازی کامپیوتری آن‌ها جهت حل هر مسئله نیاز به اعتبارسنجی دارد. از این رو معرفی روابط تجربی که بتواند مقاومت شناور را به کمک پارامترهای هندسی آن معین کند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین فعالیت‌هایی که در این زمینه انجام شده است پژوهش سویتسکی در سال ۱۹۶۴ می‌باشد. ایشان به کمک اطلاعات و داده‌های بسیار زیاد تجربی که در اختیار داشتند، روابطی را جهت محاسبه مقاومت اصطکاکی و فشاری، زاویه تریم و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی ارائه نموده‌اند[۶]. کلمنت و بلانت با انجام آزمایش‌های تجربی به بررسی مقاومت بدنه شناورهای مختلف پرداخته‌اند. در این پژوهش آزمایش تجربی بر روی پنج نوع شناور استاندارد از سری ۶۲ انجام شده است[۷]. ساواندر و رهی مقایسه‌ای بین نتایج حل عددی و تجربی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ انجام داده‌اند[۸]. توکلی و همکارانش، به وسیله گسسته‌سازی بدنه شناور تندرو، زاویه ددرایز متغیر را در روش نیمه تجربی سویتسکی اعمال نموده و با تعیین ضریب فشار برای هر بخش منشوری و سپس ضریب فشار کلی بدنه به تعیین مقاومت و مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور تندرو با زاویه ددرایز متغیر پرداخته‌اند و نتایج حاصل از روش ارائه‌شده را با نتایج تجربی مقایسه نموده‌اند[۹،۱۰].

با توجه به اهمیت مقدار مقاومت شناورهای پلنینگ، بهینه‌سازی ابعاد شناورهای تندرو برای کاهش مقاومت به همراه پایداری مناسب مورد توجه می‌باشد. برای این منظور مطالعات بسیار زیادی برای کاهش مقاومت هیدرودینامیکی با اضافه‌کردن اجزاء اضافی و تغییرات روی بدنه این شناورها انجام شده است. عمر یاکوب و همکارانش به بررسی کاهش مقاومت شناورهای پلنینگ با اضافه‌کردن یک باله پاشنه بر روی بدنه پرداختند[۱۱]. ناگای و همکارانش با مطالعه بر روی سیزده

1. Computational Fluid Dynamics (CFD)
2. Finite volume method
3. Boundary Elements Method (BEM)
4. Deadrise

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

مدل گوناگون، که دارای ترنزام، طول بدنه، تریم اولیه و ارتفاع چاین‌های گوناگون بودند، در جهت کمینه‌کردن مقاومت شناور به کمک کنترل زاویه تریم تلاش نمودند[۱۲]. سابرامانیان و همکارانش تاثیر ایجاد تونل در بدنه شناور بر مقاومت و توزیع فشار بر روی شناور پلنینگ را بررسی نموده و نسبت مقاومت به وزن شناور را بروی یک مدل خاص با و بدون تونل در بدنه را به کمک نرم‌افزارهای CFD تعیین کرده‌اند[۱۳].

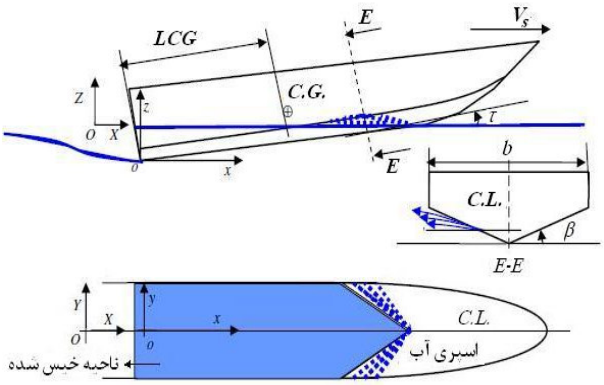
مهریزی و همکارانش با درنظر گرفتن پارامترهای اصلی هندسی فرم بدنه شناور پلنینگ و ناپایداری پروپویزینگ[1] بدنه با استفاده از روابط سویتسکی بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر روش پارتو به کمک الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند و دسته جواب‌های بهینه برای فرم بدنه شناور تندرو پلنینگ ارائه نموده‌اند[۱۴]. گامون بهینه‌سازی چندهدفه به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو روی فرم بدنه شناور ماهیگیری تک‌بدنه و پارامترهایی مانند طول، عرض و ارتفاع آبخور شناور را بهینه نموده است[۱۵]. گامون مقاومت، قابلیت دریانوردی[2] و پایداری شناور ماهیگیری را به عنوان توابع هدف درنظر گرفته است و نتایج بهینه‌سازی را بر روی شناور ماهیگیری واقعی بررسی کرده است.

در این مقاله سعی شده تا حد امکان به فیزیک واقعی بدنه شناور تندرو در تعیین مقاومت به وزن با متغیر درنظر گرفتن زاویه ددرایز پرداخته شود و روابط نیمه‌تجربی موجود با درنظر گرفتن زاویه ددرایز متغیر توسعه داده شوند. سپس با اعتبارسنجی روابط توسعه‌یافته، توسط مقایسه با نتایج تجربی، به بهینه‌سازی پارامترهای اصلی فرم بدنه شناور تندرو پرداخته شده است. مقاومت به وزن با درنظر گرفتن زاویه ددرایز متغیر به‌دست آمده از بخش اول به عنوان تابع هدف جهت کمینه‌کردن مقاومت هیدرودینامیکی بدنه به همراه برقراری قیود پایداری هیدرواستاتیکی، پایداری دینامیکی طولی و عرضی و محدویت‌های حاکم بر روابط درنظر گرفته شده است. متغیرهای بهینه‌سازی طول مرکز گرانش از ترنزام، عرض و نرخ تغییر زاویه ددرایز از ترنزام تا سینه بدنه شناور تندرو می‌باشد. درنهایت دسته جواب‌های بهینه در اعداد فرود حجمی مختلف ارائه شده که در فاز طراحی مفهومی برای طراحان مفید می‌باشد.

1. Porpoising
2. Seakeeping

۲- مشخصه‌های هیدرودینامیکی بدنه با زاویه ددرایز متغیر

در شکل ۱ مشخصه‌های هندسی و هیدرودینامیکی شناور تندرو پلنینگ نشان داده شده است. با توجه به متغیر درنظر گرفتن زاویه ددرایز (β)، نمی‌توان از روابط نیمه‌تجربی سویتسکی برای محاسبه مشخصه‌های هیدرودینامیکی مانند ضریب فشار (C_p)، زاویه تریم (τ) و نسبت طول خیس‌شده به عرض (λ) بدنه شناور تندرو استفاده نمود.



شکل ۱ مشخصه‌های‌هندسی و هیدرودینامیکی‌شناور تندرو[۳]

در ناحیه خیس‌شده شناورهای تندرو در حالت قبل از اسکی تغییرات زاویه ددرایز بین ۱۰ تا ۱۵ درجه و در حالت پس از اسکی تغییرات بین ۴ تا ۵ درجه می‌باشد[۳]. توکلی و همکارانش، برای محاسبه مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور تندرو پلنینگ با زاویه ددرایز متغیر، بدنه شناور را توسط مقاطع عرضی در راستای طول بدنه با فاصله‌های یکسان به بخش‌های منشوری تقسیم کرده و با استفاده از نگاشت همدیس[3] و معادلات دیفرانسیل شوارز-کریستوفل[4] ضریب فشار (C_p) و سپس نسبت متوسط طول خیس‌شده به عرض (λ) را تعیین کرده‌اند.

زاویه تریم نیز با استفاده از معادل کلی تعادل و ضریب فشار و نسبت متوسط طول خیس‌شده به عرض محاسبه شده است. در ادامه، برای تعیین مقاومت بدنه شناور تندرو، مشخصه‌های هیدرودینامیکی مورد نیاز از روش‌ارائه شده در مرجع [۱۰] استخراج شده است.

3. Conformal mapping
4. Schwarz-Christoffel

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

۳- مقاومت هیدرودینامیکی

در این مقاله، مقاومت هیدرودینامیکی برای بدنه شناور تندرو به دو بخش مقاومت فشاری[1] و مقاومت اصطکاکی[2] مطابق (۱) تقسیم می‌شود که در هر دو مقاومت متغیربودن زاویه ددرایز اعمال خواهد شد. این دو مقاومت نسبت به دیگر مقاومت‌ها مانند مقاومت اسپری آب، هوا، موج‌سازی[3] و غیره از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند.

$$R_h = R_p + R_f \qquad (۱)$$

مقاومت اسپری آب نیز از مولفه‌های مهم در تخمین مقاومت کل شناور تندرو می‌باشد، اما هنوز هیچ روشی برای محاسبه مقاومت اسپری آب برای نمونه واقعی ارائه نشده است و نحوه محاسبه مقاومت اسپری آب، که توسط سویتسکی در سال ۲۰۰۷ بیان شده است، با استفاده از تست مدل و مقادیر مربوط به مدل می‌باشد و برای شناور واقعی نمی‌توان از این روش بهره برد، زیرا مقدار C_{fs} وابسته به عدد رینولدز و جریان اطراف بدنه می‌باشد و روابط به‌دست آمده برای C_{fs} براساس نتایج تست مدل می‌باشد و قابل تعمیم برای نمونه واقعی نمی‌باشد.

۳-۱- مقاومت فشاری (R_p)

برای تعیین مقاومت فشاری، زاویه تریم (τ) بدنه شناور تندرو پلنینگ با زاویه ددرایز متغیر در سرعت‌های مختلف از مرجع [۱۰] استخراج می‌شود. با تعیین زاویه تریم، مقاومت فشاری براساس وزن شناور(Δ) به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$R_p = \Delta \tan\tau \qquad (۲)$$

۳-۲- مقاومت اصطکاکی (R_f)

مقاومت اصطکاکی از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است و روابط برای تعیین این مقاومت با درنظر گرفتن تغییرات زاویه ددرایز در راستای طول بدنه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_f = \frac{D_f}{\cos\tau} = \frac{\rho V_1^2 \lambda b^2 C_f}{2\cos\beta(x)\cos\tau} \qquad (۳)$$

که b عرض آبخور بدنه، λ نسبت متوسط طول خیس‌شده به عرض (از مرجع [۹] استخراج می‌شود)، ρ چگالی آب برابر ۱۰۲۵ kg/m^3 و C_f ضریب اصطکاکی (در سال ۱۹۵۷ توسط ITTC[4] تعریف شده است) می‌باشد. سرعت متوسط جریان سطح زیر شناور با نماد V_1 نمایش داده می‌شود که کمی کوچک‌تر از سرعت پیشروی شناور است.

$$\frac{V_1}{V} = \sqrt{1 - \frac{0.012\tau^{1.1}}{\lambda^{0.5}\cos\tau} f(\beta(x))} \qquad (۴)$$

برای سطوح پلنینگ مقدار $f(\beta)$ با استفاده از نمودارهای ارائه‌شده توسط سویتسکی براساس نتایج تجربی به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۶].

$$f(\beta) = 0.0127\lambda^2 + 0.125\lambda\tau - 0.22\lambda + 0.05\tau - 0.05\beta(x) + 1.30 \qquad (۵)$$

مقدار مقاومت اصطکاکی، با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه (۳) و انتگرال‌گیری عددی به روش سیمسون[5]، در محدوده متوسط طول خیس‌شده ($L_{ws} = \lambda b$) به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$R_f = \frac{\rho V^2 b}{2\cos\tau}\int_0^{L_{ws}} \frac{C_f\left(1 - Kf(\beta(x))\right)}{\cos(\beta(x))}dx \quad , \quad K = \frac{0.012\tau^{1.1}}{\lambda^{0.5}\cos\tau} \qquad (۶)$$

۴- نتایج حاصل از توسعه روابط نیمه‌تجربی

در این مقاله تغییرات زاویه ددرایز در راستای طول بدنه تا سینه شناور خطی فرض می‌شود و از رابطه کلی زیر برای آن استفاده شده است:

$$\beta = \beta(x) = ax + b \qquad (۷)$$

a نرخ تغییرات زاویه ددرایز در راستای طول با واحد درجه بر متر و b زاویه آغازین ددرایز در ترنزام بدنه شناور می‌باشد. برای اعتبارسنجی روش ارائه‌شده، از نتایج تجربی برای بدنه شناور تندرو مدل ۴۶۶۶ از سری ۶۲ با زاویه ددرایز متغیر استفاده می‌شود[۷]. مشخصات بدنه مورد آزمایش تجربی در جدول ۱ آورده شده است.

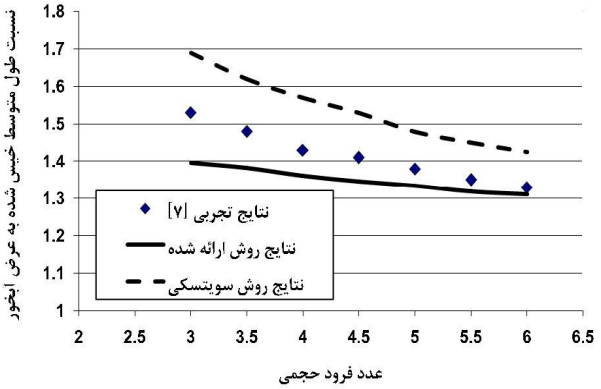
در شکل ۲ مقایسه بین نسبت طول متوسط خیس‌شده به عرض آبخور (λ) برای روش ارائه‌شده، نتایج روش نیمه‌تجربی سویتسکی و نتایج تجربی ارائه شده است.

1. Pressure Resistance
2. Frictional Resistance
3. Wave Pattern
4. International Towing Tank Conference
5. Simpson

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

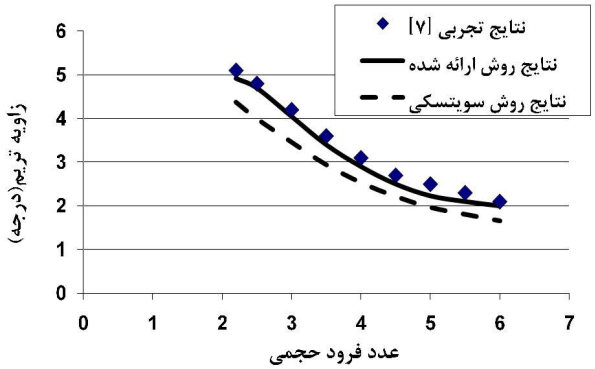
جدول ۱ مشخصات شناور تندرو مدل ۴۶۶۶ از سری ۶۲[۷]

مشخصات بدنه	مقدار
نسبت طول به عرض	۳/۰۶
طول کلی شناور LOA(m)	۲۱/۵
وزن جابه‌جایی Δ(ton)	۴۵
فاصله مرکز ثقل تا ترنزام lcg (m)	۹/۰۷
زوایه ددرایز β (deg)	۰/۳۸ x +۱۲



شکل ۲ مقایسه λ بین روش ارائه‌شده، روش سویتسکی و نتایج تجربی

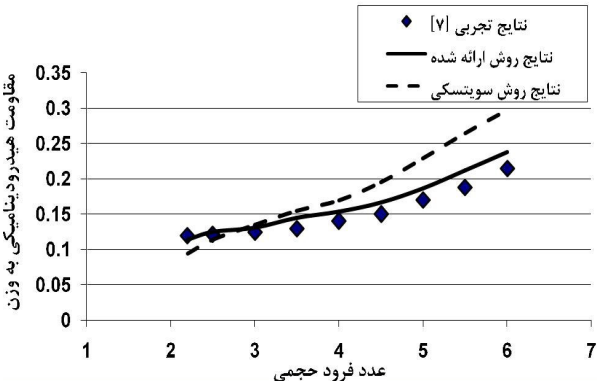
در شکل ۲ بیشترین و کمترین اختلاف بین نتایج روش ارائه‌شده با نتایج تجربی به‌ترتیب در عدد فرود حجمی ۳ و ۶ می‌باشد که ۸/۵ و ۱ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج روش ارائه‌شده با نتایج تجربی با افزایش سرعت برای تعیین نسبت طول متوسط خیس‌شده به عرض آبخور (λ) می‌باشد. با افزایش سرعت، این تطابق بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده تاثیر بیشتر زاویه ددرایز متغیر در سرعت‌های بالا می‌باشد. همچنین مسئله از لحاظ هیدرودینامیکی با واقعیت مطابقت بهتری دارد. براساس شکل ۲ روش ارائه‌شده از دقت بیشتری نسبت به روش نیمه‌تجربی سویتسکی برخوردار می‌باشد که در این روش زاویه ددرایز ثابت فرض شده است. در روش سویتسکی با افزایش سرعت تغییرات کمی در اختلاف نتایج این روش با نتایج تجربی حاصل می‌شود در حالی که در روش ارائه‌شده این اختلاف در حد قابل توجهی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تاثیر متغیر درنظر گرفتن زاویه ددرایز در سرعت‌های بالا می‌باشد. در شکل ۳ مقایسه بین زاویه تریم محاسبه‌شده، نتایج روش نیمه‌تجربی سویتسکی و نتایج تجربی در اعداد فرود حجمی مختلف ارائه شده است.



شکل ۳ مقایسه بین زاویه تریم (τ) محاسبه‌شده با روش سویتسکی و نتایج تجربی

شکل ۳ تطابق خوب بین زاویه تریم محاسبه‌شده و نتایج تجربی با زاویه ددرایز متغیر را نشان می‌دهد. همچنین، به‌خوبی دقت بهتر روش ارائه‌شده نسبت به روش نیمه‌تجربی سویتسکی نمایان می‌باشد.

در شکل ۴ نیز مقایسه بین نتایج حاصل از روش نیمه‌تجربی سویتسکی با زاویه ددرایز ثابت ($\beta = 12.5^\circ$) و روش ارائه‌شده با نتایج تجربی آورده شده است.

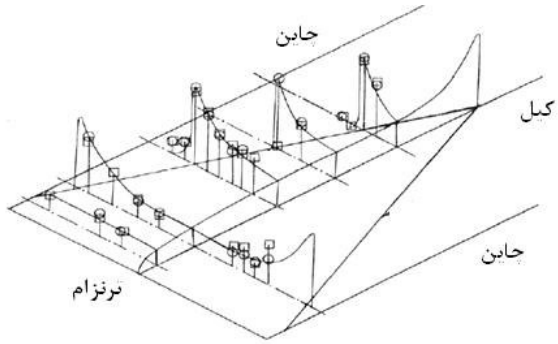


شکل ۴ مقایسه R_h/Δ در دو حالت زاویه ددرایز ثابت (روش سویتسکی) و متغیر (روش ارائه‌شده) با نتایج تجربی

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص می‌باشد، با افزایش سرعت اختلاف نتایج حاصل از روش نیمه‌تجربی سویتسکی، که زاویه ددرایز را ثابت فرض کرده بود، از نتایج تجربی بیشتر می‌شود، البته تمام این افزایش اختلاف به خاطر ثابت درنظر گرفتن زاویه ددرایز نمی‌باشد. حال آنکه روش ارائه‌شده از دقت مناسب‌تری نسبت به روش سویتسکی برخوردار می‌باشد. دقت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

مناسب روش ارائه‌شده به دلیل متغیرگرفتن زاویه ددرایز در محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی و محاسبه ضریب فشار (C_p)، نسبت طول متوسط خیس‌شده به عرض آبخور (λ) و زاویه تریم (τ) براساس تقسیم بدنه شناور به بخش‌های منشوری (در مرجع [۱۰] شرح داده شده است) و تاثیر زاویه ددرایز متغیر در محاسبه این مشخصه‌های هیدرودینامیکی می‌باشد. در محاسبه λ، ضریب فشار (C_p) تاثیر دارد و λ و τ در محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی تاثیرگذار می‌باشند. اختلاف موجود در روش حاضر با نتایج تجربی به دلیل پیدایش پدیده‌های هیدرودینامیکی پیچیده در سرعت‌های بالا مانند ایجاد فشار منفی در پاشنه شناور به هنگام جدایش آب از بدنه می‌باشد که توزیع فشار متفاوتی با آنچه در روش ارائه شده درنظر گرفته شده است، در انتهای بدنه حاکم می‌شود. همچنین، این اختلاف در نتایج می‌تواند به خاطر فرضیات مسئله باشد مانند این که در انتهای بدنه توزیع فشار در حالت چاین خشک[1] درنظر گرفته شده است. براساس شکل ۵، توزیع فشار در انتهای ناحیه خیس‌شده در حالت چاین تر[2] می‌باشد.



شکل ۵ توزیع فشار عرضی و طولی در ناحیه‌خیس‌شده[۲۰]

اما با توجه به شکل ۵ تمرکز فشار طولی، که حاصل از منحنی‌های فشار عرضی می‌باشد، در جلوی ناحیه خیس‌شده می‌باشد. در روش ارائه‌شده برای ضریب فشار کل بدنه از حالت چاین خشک در جلوی ناحیه خیس‌شده استفاده شده است که به دلیل تاثیر هر چند کم توزیع فشار در انتهای ناحیه خیس‌شده در حالت چاین تر می‌تواند خطا در محاسبه ضریب فشار بدنه ایجاد شود که در نتایج نهایی تاثیرگذار می‌باشد.

1. Dry Chine
2. Wetted Chine

درصد اختلاف متوسط روش ارائه‌شده و روش سویتسکی نسبت به نتایج تجربی در جدول ۲ با توجه به شکل‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲ درصد اختلاف متوسط روش ارائه‌شده و روش نیمه‌تجربی سویتسکی با نتایج تجربی

روش‌ها	اختلاف متوسط (درصد)		
	λ	τ	R_h/Δ
روش ارائه‌شده	۴/۵	۳/۵	۸
روش سویتسکی	۸/۶	۱۱	۱۵

۵- بهینه‌سازی

روابط و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی شناور نظیر عرض شناور، زاویه ددرایز و موقعیت مرکز گرانش در مقدار مقاومت هیدرودینامیکی شناور موثر است. وابستگی این پارامترها با مقاومت هیدرودینامیکی به طور واضح مشخص نمی‌باشد. از این رو یکی از مشکلات موجود در طراحی این شناورها تعیین بهینه این مقادیر هندسی می‌باشد.

بهینه‌سازی به کمک روش الگوریتم ژنتیک برای بدنه شناور تندرو پلنینگ مدل ۴۶۶۶ از سری ۶۲ با وزن ۴۵ تن و زاویه ددرایز در ترنزام ۱۲ درجه انجام شده است. در بهینه‌سازی سعی شده در سرعت‌های مختلف مقادیر بهینه برای طول مرکز گرانش از ترنزام (lcg)، عرض آبخور(b) و نرخ تغییرات زاویه ددرایز در راستای طول(β') برای کارایی مناسب شناور تندرو تعیین شود. تابع هدف مقاومت هیدرودینامیکی به وزن براساس روش ارائه شده در بخش ۳ می‌باشد.

۵-۱- قیود بهینه‌سازی

درنظر گرفتن قیود مناسب، نتایج بهینه‌سازی را منطقی و قابل قبول می‌سازد و هر چه قیود درنظر گرفته شده با شرایط شناور در سرعت‌های بالا مطابقت داشته باشد، اطمینان به نتایج بهینه‌سازی بیشتر می‌شود. قیود درنظر گرفته شده در بهینه‌سازی به شرح زیر هستند:

۱- محدودیت‌های حاکم بر روابط نیمه‌تجربی

در روابط نیمه‌تجربی مورد استفاده محدودیت‌هایی به شرح زیر وجود دارد.

$$1 \le \lambda \le 5, \quad 0 \le \tau \le 6, \qquad 10 \le \beta \le 30 \qquad (۸)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

بنابراین در چرخه بهینه‌سازی باید کلیه پارامترها در محدوده فوق باقی بمانند.

۲- پایداری استاتیکی

برای برقراری پایداری استاتیکی باید نقطه متاسنتر[1] (M) بالای مرکز گرانش (G) قرار گیرد ($GM > 0$). برای تعیین مقدار GM یک کشتی واقعی می‌توان از آزمایش کج‌کردن کشتی[2] استفاده نمود.

$$GM = KB + BM - KG \quad (۹)$$

$$KB = \frac{5}{6}d - \frac{\nabla}{3A_w} \quad (۱۰)$$

KG فاصله مرکز ثقل شناور از کیل[3] و KB ارتفاع مرکز شناوری در بالای کیل است که با توجه به مرکز هندسی سطح مقطع خیس‌شده قابل محاسبه می‌باشد. همچنین می‌توان از رابطه تقریبی ماریش[4] بهره برد که d آبخور شناور در حالت سکون و A_w مساحت صفحه آبخور می‌باشد. BM با درنظر گرفتن مشخصات هندسی به صورت زیر معین می‌گردد:

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (۱۱)$$

I ممان دوم عرضی صفحه آبخور حول خط مرکزی شناور می‌باشد. جهت اطمینان از پایداری استاتیکی شناور $GM > ۱$ در بهینه‌سازی قرار داده می‌شود. به‌عبارتی دیگر GM حداقل یک متر می‌باشد.

۳- پایداری دینامیکی طولی (پروپویزینگ)

برای قید پایداری دینامیکی طولی و زاویه تریم بحرانی (τ_{cr})، که در این زاویه پورپویز رخ می‌دهد، می‌توان رابطه زیر را استفاده نمود[۱۷]:

$$\tau_{cr} = 80.87\frac{C_{L\beta}}{2} - 0.0017\,\beta^2 - 0.3125\,\beta\sqrt{\frac{C_{L\beta}}{2}} + 12.54\sqrt{\frac{C_{L\beta}}{2}} + 0.193\,\beta - 1.87 \quad (۱۲)$$

به منظور عدم وقوع پورپویزینگ، زاویه تریم شناور (τ) باید کمتر از مقدار بحرانی (τ_{cr}) باشد و به منظور حاشیه اطمینان بیشتر در بهینه‌سازی نیم درجه از تریم بحرانی کاسته شده است و به صورت زیر درنظر گرفته شده است.

$$\tau \le \tau_{cr} - 0.5 \quad (۱۳)$$

۴- پایداری دینامیکی عرضی

در سال ۱۹۹۷ مهم‌ترین و کاربردی‌ترین تحقیق در مورد پایداری عرضی شناورهای پلنینگ توسط لواندوسکی انجام شده است[۱۸]. ایشان با حل معادلات حرکت کوپل‌شده جانبی[5]، گردش جانبی[6] و غلتش[7] چگونگی تغییر ارتفاع GM شناورهای پلنینگ با عرض، زاویه ددرایز، زاویه تریم، آبخور ترنزام و سرعت پیشروی را ارائه نموده است. در نهایت پس از حل معادلات حرکت معادله درجه چهار زیر حاصل می‌شود[۱۸].

ضرایب A، B، C، D و E براساس مشخصات هیدرودینامیکی شناور تندرو پلنینگ تعیین می‌شوند[۱۹]. رابطه (۱۴) دارای چهار ریشه حقیقی یا مختلط می‌باشد که ریشه‌های مختلط مربوط به پاسخ‌های ارتعاشاتی سیستم است. به منظور بررسی پایداری سیستم، باید قسمت حقیقی تمام ریشه‌های رابطه (۱۴) منفی باشد. به عنوان قید چهارم منفی بودن ریشه‌های رابطه (۱۴) جهت پایداری دینامیکی عرضی در بهینه‌سازی درنظر گرفته شده است.

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (۱۴)$$

۶- نتایج بهینه‌سازی

به طور کلی برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در ابتدا باید محدوده برای متغیرهای بهینه‌سازی تعیین شود تا الگوریتم برای تولید عضوهای هر نسل از محدوده متغیرها استفاده نماید. سپس برای هر عضو برقراربودن قید مسئله چک می‌شود و در صورت ارضاءشدن قیود مقدار تابع هدف برای هر عضو تعیین می‌شود. سپس الگوریتم ژنتیک نسل بعدی را براساس نتایج نسل قبلی و تولید عضوهای جدیدی آغاز می‌نماید. در تولید نسل جدید الگوریتم ژنتیک از روش‌های مختلفی استفاده می‌نماید. نسل جدید با استفاده از عملگرهای تلفیق[8] و جهش[9] جهش[9] تولید می‌شوند و اعضای برتر نسل قبل نیز به نسل جدید راه می‌یابند. با توجه به مطالب ذکرشده جهت انجام بهینه‌سازی، ساختار کلی به صورت زیر می‌باشد:

1. Metacentre
2. Inclining experiment
3. Keel
4. Murrish
5. Sway
6. Yaw
7. Roll
8. Mutation
9. Crossover

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

تابع هدف : $f(x) = \frac{R_f + R_p}{\Delta}$

قیود
$$\begin{cases} 0.6 \le C_v \le 9 \\ 0.1 \le \tau \le 6 \\ 1 \le \lambda \le 5 \\ GM > 1 \\ \tau \le \tau_{cr} - 0.5 \\ Transverse \quad Dynamic \\ Stability\ (Eq.15) \end{cases}$$

متغیرهای طراحی : $x = [lcg, b, \beta']$

بهینه‌سازی در پنج سرعت مختلف پلنینگ (متناظر با اعداد فرود حجمی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶) با وزن ۴۵ تن صورت گرفته است. براساس کد نوشته‌شده جواب بهینه‌ای که برای هر حالت تعیین شده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی در عدد فرود حجمی مختلف

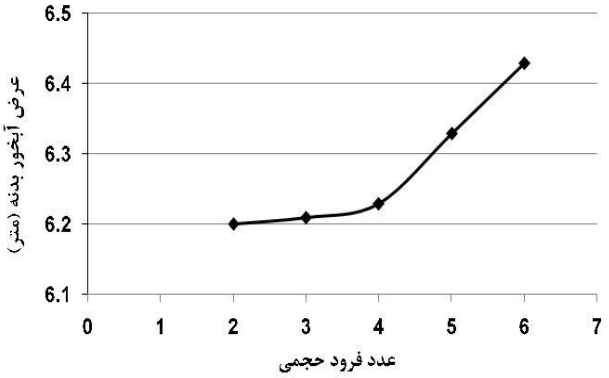
عدد فرود حجمی	موقعیت مرکز گرانش از ترنزام (متر)	عرض (متر)	نرخ تغییرات زاویه ددرایز (درجه بر متر)	زاویه ددرایز در مرکز گرانش (درجه)	طول (متر)
۲	۹/۹۱	۶/۲	۰/۶۴	۱۸/۳۴	۳۱/۴۶
۳	۹/۹۹	۶/۲۱	۰/۱	۱۳	۳۱/۷۱
۴	۹/۴۴	۶/۲۳	۰/۲۱۳	۱۴/۰۱	۲۹/۹۶
۵	۸/۸۲	۶/۳۳	۰/۱۲۵	۱۳/۱	۲۸
۶	۸/۰۵	۶/۴۳	۰/۱	۱۲/۸	۲۵/۵۵

برای درک بهتر نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی و تشخیص تغییرات هر یک از متغیرها نسبت به افزایش سرعت (عدد فرود حجمی)، در شکل ۶، تغییرات طول مرکز گرانش، در شکل ۷، تغییرات عرض آبخور شناور، در شکل ۸، تغییرات نرخ تغییر زاویه ددرایز نسبت به اعداد فرود حجمی مختلف نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی) طول مرکز گرانش حاصل از بهینه‌سازی کاهش یافته و در سرعت‌های بالاتر، با کاهش طول مرکز گرانش، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه وارد می‌شود.

در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی)، عرض بدنه شناور حاصل از بهینه‌سازی افزایش یافته و در سرعت‌های بالاتر، با افزایش عرض شناور، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه وارد می‌شود.

شکل ۶ تغییرات طول مرکزگرانش بر حسب عدد فرود حجمی



شکل ۷ تغییرات عرض بدنه شناور بر حسب عدد فرود حجمی

با کنار هم گذاشتن شکل ۶ و شکل ۷ بر اساس قیود درنظر گرفته شده در بهینه‌سازی این نکته مشهود می‌باشد که با کاهش نسبت طول مرکز گرانش به عرض بدنه در سرعت‌های بالا مقاومت کمتری به بدنه شناور وارد می‌شود.

شکل ۸ نرخ تغییرات زاویه ددرایز بر حسب عدد فرود حجمی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

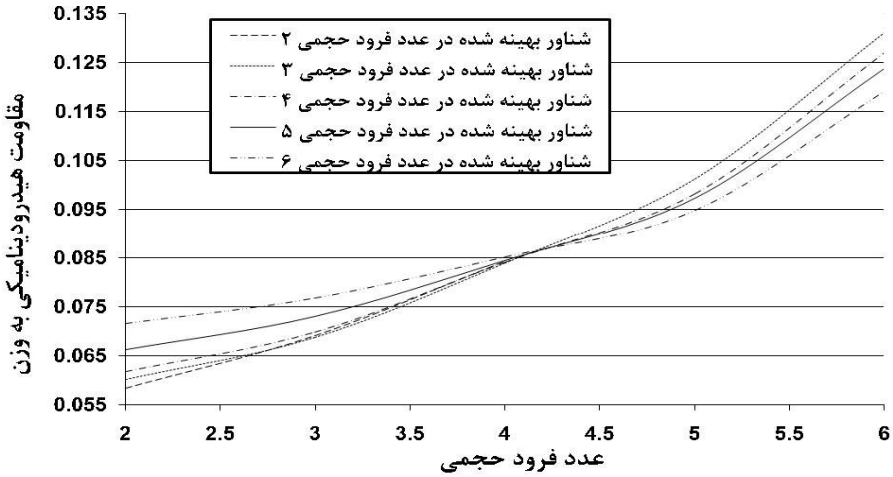
همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی) نرخ تغییرات زاویه ددرایز حاصل از بهینه‌سازی کاهش یافته است و در سرعت‌های بالاتر، با کاهش نرخ تغییرات زاویه ددرایز، مقاومت کمتری به بدنه وارد می‌شود.

در جدول ۳ ابعاد بهینه در سرعت خاص تعیین شده است. برای مقایسه نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ در سرعت‌های دیگر شکل ۹ ارائه شده است.

ابعاد بهینه به‌دست آمده در عدد فرود ۲ در سرعت‌های بالاتر از عدد فرود ۴ قیود بهینه‌سازی را نقض می‌کند. به همین دلیل در شکل ۹ منحنی مقاومت به وزن شناور بهینه در عدد فرود ۲ تا عدد فرود ۴ رسم شده است. ابعاد بهینه در عدد فرودهای حجمی دیگر در سرعت‌های مختلف قیود را نقض نمی‌کنند.

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص می‌باشد، در اعداد فرود حجمی کمتر از ۴/۲، بدنه‌های بهینه در اعداد فرود حجمی ۲، ۳ و ۴ دارای مقاومت به وزن کمتر و در اعداد فرود حجمی بیشتر از ۴/۲ بدنه‌های بهینه در اعداد فرود حجمی ۵ و ۶ دارای مقاومت به وزن کمتر می‌باشند. از شکل ۹ این نکته نیز قابل توجه می‌باشد که در بین نمودار مقاومت به وزن بدنه‌های بهینه رسم‌شده بدنه بهینه در عدد فرود حجمی ۵ در تمامی اعداد فرود حجمی دارای تغییرات مقاومت به وزن متوسطی نسبت به دیگر بدنه‌های بهینه می‌باشد و می‌توان بدنه بهینه در عدد فرود حجمی ۵ را به عنوان بدنه بهینه مناسب برای استفاده در اعداد فرود حجمی ۲ تا ۶ انتخاب نمود. همچنین، تمامی بدنه‌های بهینه در عدد فرود حجمی ۴/۲ تقریباً دارای مقاومت به وزن یکسانی می‌باشند و قبل و بعد از این عدد فرود حجمی مقاومت به وزن بدنه بهینه رفتار متفاوتی در مقایسه با دیگر بدنه‌های بهینه دارد. به طور مثال، بدنه بهینه در عدد فرود حجمی ۶ قبل از عدد فرود حجمی ۴/۲ دارای بیشترین مقاومت به وزن و بعد از عدد فرود حجمی ۴/۲ دارای کمترین مقاومت به وزن نسبت به دیگر بدنه‌های بهینه می‌باشد. این تفاوت رفتار مقاومت به وزن به دلیل هدف بهینه‌سازی می‌باشد. بدین ترتیب هنگامی که سرعت طراحی در فاز طراحی مفهومی در محدوده عدد فرود حجمی ۳ است، بدنه‌هایی برتر شناخته می‌شوند که در این سرعت دارای کمینه مقاومت به وزن باشند و در اعداد فرود حجمی دیگر تحت بهینه‌سازی قرار ندارد.

اکنون طراح با داشتن اطلاعات کافی از نوع کاربری شناور مورد نظر و مشخص‌بودن سرعت طراحی شناور در فاز طراحی مفهومی به‌راحتی می‌تواند بدنه با کمترین مقاومت هیدرودینامیکی را انتخاب نماید. به طور مثال، برای شناورهای گشت ساحلی، که اغلب در سرعت‌های متوسط حرکت می‌کنند، می‌توان از بدنه‌های بهینه در اعداد فرود حجمی پایین استفاده کرد و برای شناورهای نظامی، که اغلب در سرعت‌های بالا حرکت می‌نمایند، از بدنه بهینه در اعداد فرود حجمی بالا انتخاب نمود. با مشخص‌بودن سرعت مورد نیاز برای طراح و با انتخاب بدنه بهینه مطلوب و خواندن مقاومت هیدرودینامیکی از شکل ۹، می‌توان توان مورد نیاز شناور را تعیین نمود که در انتخاب سیستم رانش شناور حائز اهمیت می‌باشد.



شکل ۹ مقاومت هیدرودینامیکی به وزن بدنه‌های بهینه در اعداد فرود حجمی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در سرعت‌های مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی بدنه شناور تندرو با زاویه ددرایز متغیر، به توسعه روش نیمه‌تجربی سویتسکی پرداخته شده است. با اعمال تغییرات زاویه ددرایز در روابط هیدرودینامیکی، به اعتبارسنجی روش ارائه‌شده با نتایج تجربی پرداخته شده است. روش ارائه‌شده در محاسبه نسبت متوسط طول خیس‌شده به عرض بدنه (λ)، زاویه تریم (τ) و مقاومت به وزن (R_t/Δ) با نتایج تجربی از مطابقت خوبی برخوردار می‌باشد و در مقایسه با روش نیمه‌تجربی سویتسکی نسبت به نتایج تجربی برای شناورهای تندرو پلنینگ، که زاویه ددرایز ثابت فرض شده است، دارای دقت بیشتری است که به دلیل نزدیک‌تر شدن تحلیل‌ها به واقعیت فیزیکی بدنه شناورهای تندرو می‌باشد.

در ادامه سعی شده بهینه‌سازی به کمک روش الگوریتم ژنتیک برای نیل به فرم هندسی بهینه برای بدنه شناور تندرو پلنینگ ارائه شود. در نهایت فرم هندسی بهینه‌شده‌ای برای نمونه واقعی ارائه شده است. از نتایج بهینه‌سازی می‌توان تغییرات متغیرها را به صورت زیر تحلیل کرد:

با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی)، طول مرکز گرانش حاصل از بهینه‌سازی کاهش یافته است و در سرعت‌های بالاتر، با کاهش طول مرکز گرانش، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه وارد می‌شود.

با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی)، عرض بدنه شناور حاصل از بهینه‌سازی کاهش یافته است و در سرعت‌های بالاتر، با افزایش عرض شناور، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه وارد می‌شود.

با کاهش نسبت طول مرکز گرانش به عرض بدنه شناور در سرعت‌های بالا، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه شناور وارد می‌شود.

با افزایش سرعت (عدد فرود حجمی)، نرخ تغییرات زاویه ددرایز حاصل از بهینه‌سازی کاهش یافته است و در سرعت‌های بالاتر، با کاهش نرخ تغییرات زاویه ددرایز، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری به بدنه وارد می‌شود.

همچنین، نموداری ترکیبی از بین بدنه‌های بهینه حاصل از بهینه‌سازی برای انتخاب بدنه مورد نیاز طراح براساس نوع کاربری و سرعت طراحی شناور در فاز طراحی مفهومی ارائه شده است. همچنین، بدنه مناسب در بین بدنه‌های بهینه ارائه شده برای استفاده در محدوده اعداد فرود حجمی ۲ تا ۶ بدنه بهینه در عدد فرود حجمی ۵ معرفی شده است.

۸- مراجع

[1] Panahi R., Jahanbakhsh E., Seif M. S., "Towards Simulation of 3D Nonlinear High-Speed Vessels Motion", *Ocean Engineering*, Vol. 36, 2009, pp. 256-265.

[2] Sahoo P. K., Doctors L. J., Pretlove L., "CFD Prediction of the Wave Resistance of a Catamaran", *International Conference in Marine Hydrodynamics*, Vol. 1, 2006, pp. 867-879.

[3] H Ghassemi., M Ghiasi., "A Combined Method for the Hydrodynamic Characteristics of Planning Crafts", *Ocean Engineering*, Vol. 35, November, 2007, pp. 310-322.

[4] Kohansal A. R., Ghassemi H., "A Numerical Modeling of Hydrodynamic Characteristics of Various Planning Hull Forms", *Ocean Engineering*, Vol. 37, 2010, pp. 498-510.

[5] Brizzolara S., Serra F., "Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planning Surfaces Hydrodynamic Characteristics", *2nd International Conference on Marine Research and Transportation*, Naples, Italy, Vol. 1, 2007, pp. 147-159.

[6] Savitsky D., "Hydrodynamic Design of Planning Hull", *Marine Technology*, Vol. 1, No. 1, 1964, pp. 71-95.

[7] Clement E. P., Blount D. L., "Resistance Test of Systematic Series of Planning Hulls Forms", *SNAME Transaction*, Vol. 71, 1963, pp. 491-579.

[8] Savander B. R., Rhee S. H., "Steady Planning Hydrodynamics: Comparison of Numerical and Experimental Results", *Fluent Users' Group Manchester*, NH, 2003.

[۹] توکلی دخرآبادی م.، وفایی‌صفت، ع.، سیف، م. س.، "مقایسه مقاومت هیدرودینامیکی بدنه شناورهای تندرو حالت پروازی با زاویه ددرایز متغیر نسبت به زاویه ددرایز ثابت بر اساس روش سویتسکی"، *نوزدهمین همایش بین‌المللی مهندسی مکانیک*، ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۰.

[۱۰] توکلی دخرآبادی م.، وفایی‌صفت ع.، سیف م. س.، "محاسبه مشخصه‌های هیدرودینامیکی بدنه شناور تندرو حالت پروازی با زاویه ددرایز متغیر"، *سیزدهمین همایش صنایع دریایی*، ایران، جزیره کیش، ۱۳۹۰.

[11] Yaakob O., Shamsuddin S., King K. K., "Stern Flap for Resistance Reduction of Planning Hull Craft", *Journal Technology*, Vol. 41(A) Dis, 2004, pp. 43-52.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]

[12] Nagai T., Yoshida Y., Kawasaki T., "Minimum Resistance Hull Form of Planning Craft with Controlled Trim Angle", *Naval Arch Japan*, Vol. 137, 1995, pp. 48-57.

[13] Subramanian V. A., Subramanyam P. V. V., Sulficker N., "Pressure and Drag Influences Due to Tunnels in High-Speed Planning Craft", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 54, 2007, pp. 25-44.

[۱۴] مهریزی ا.، وفایی‌صفت ع.، سیف م.، کاظمی ح.، "بهینه‌سازی چندگانه شناورهای تندرو حالت پروازیدر آب‌های آرام"، *دوازدهمین همایش صنایع دریایی*، ایران، زیبا کنار، ۱۳۸۹.

[15] Gammon M., "Optimization of Fishing Vessel using a Multi Objective Genetic Algorithm", *Ocean Engineering*, Vol. 38, 2011, pp. 1054-1064.

[۱۶] وفایی‌صفت ع.، سیف م. س.، مهریزی ا.، قصاب‌زاده م.، "بهینه سازی پارامترهای موثر در عملکرد شناورهای تندرو حالت پروازی برای دستیابی به حداکثر سرعت"، *هجدهمین همایش بین‌المللی مهندسی مکانیک*، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.

[17] Lewandowski E. M., *The Dynamic of Marin Craft: Maneuvering and Seakeeping*, World Scientific Publishing Co., Washington DC, 2004, pp. 379-383.

[18] Lewandowski E. M., "Transverse Dynamic Stability of Planning Craft", *Marine Technology*, Vol. 34, No. 2, 1997, pp. 109-118.

[۱۹] توکلی دخرآبادی م.، امینی ا.، مهریزی ا.، "بررسی تاثیر مشخصه‌های فیزیکی شناور تندرو بر پایداری دینامیکی عرضی آن در حالت پلنینگ"، *سیزدهمین همایش صنایع دریایی*، ایران، جزیره کیش، ۱۳۹۰.

[20] Savitsky D., Morabito M., *Origin and Characteristics of the Spray Patterns Generated by Planing Hull*", Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Report 2882, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.11.2]