

بهینه سازی چند هدفه هیدرودینامیکی فرم بدنه شناور تندرو پلنینگ به کمک الگوریتم ژنتیک در آب آرام

اصغر مهریزی^{۱*}، محمد توکلی دخرآبادی^۲، عباس وفایی صفت^۳، محمد سعید سیف^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی دریا، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار، گروه مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۴- استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تاکنون روش‌های زیادی جهت بهبود رفتار هیدرودینامیکی این شناورها معرفی شده است، ولی اکثر این تلاش‌ها به صورت موردی بوده و هیچ کدام از این تحقیقات منجر به ارائه یک برنامه یا روش نظام مند جهت بهینه‌سازی فرم بدنه این شناورها نشده است. در این مقاله تلاش شده است برای اولین بار یک برنامه مدون به منظور معرفی فرم بدنه بهینه شناور با توجه به سرعت و وزن مورد نظر ارائه گردد. با استفاده از روش نیمه تجربی سویتسکی پارامترهای هندسی بهینه شناور تندرو پلنینگ معرفی شده تا مقاومت هیدرودینامیکی کمینه شود. برای بهینه‌سازی هیدرودینامیکی فرم بدنه شناور تندرو، متغیرهای عرض شناور، زاویه ددرایز و طول مرکز گرانش از ترنزام و دو تابع هدف تعریف شده است. در بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو استفاده شده است. تابع هدف اول مجموع مقاومت فشاری و اصطکاکی بر وزن و تابع هدف دوم نسبت سطح خیس شده اسپری آب بر حجم جابجایی به توان دو-سوم می‌باشد. قیود در نظر گرفته شده در بهینه سازی شامل محدودیت‌های حاکم بر روش نیمه تجربی سویتسکی، پایداری هیدرواستاتیکی، عدم ناپایداری پورپوزینگ و پایداری دینامیکی ماریچ می‌باشد. در نهایت دسته جواب‌های بهینه‌ای از متغیرها برای استفاده طراحان در طراحی مفهومی شناورهای تندرو تک‌بدنه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: شناور تندرو، مقاومت هیدرودینامیکی، پایداری، بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک

Hydrodynamic Optimization of Hull Form of High Speed Planing Craft by Multi Objective Genetic Algorithm in Calm Water

A. Mehrizi¹, M. Tavakoli Dakhrabadi², A. Vafaei Sefat³, M.S. Seif⁴

1- M.Sc, Mech. Eng. Dep't, Imam Hossein Univ.

2- PhD Student, Mech. Eng. Dep't, Sharif Univ. of Tech

3- Associate Professor, Mech. Eng. Dep't, Imam Hossein Univ.

4- Professor, Mech. Eng. Dep't, Sharif Univ. of Tech.

Abstract

So far many case-study researches have been undertaken to propose suitable models for hull optimization of planning high-speed crafts. In this paper a systematic and generic method is illustrated for the first time to introduce the optimized hull form of craft considering the desired speed and weight. Using semi-empirical Savitsky's method, optimal geometrical parameters of planning high-speed craft are defined to minimize the hydrodynamic resistance. Of course some variants i.e. beam, deadrise and the distance of center of gravity to transom and two objective functions are introduced for hull optimization via Pareto-based genetic algorithm.

*نویسنده مسؤول مقاله a.mehrizi@gmail.com

The first objective function is the ratio of pressure and frictional resistance summation to displacement and the second one is the ratio of water spray's wetted area to displacement volume powered two-thirds. Optimization involves constraints such as: governing limitations on Savitsky method, hydrostatic stability, proposing instability and corkscrew dynamic stability. Finally a bunch of variants optimal quantities are presented to be applied in conceptual designing of high-speed monohull crafts.

Keywords: High Speed Vessel, Hydrodynamic Resistance, Stability, Multi Objective Optimization, Genetic Algorithm

۱- مقدمه

با افزایش علاقه و نیاز بشر به داشتن شناورهای سریعتر، شناورهای تندرو مختلفی معرفی شده‌اند که هر یک از آنها دارای معایب و مزایا مربوط به خود می‌باشند. شناور تندرو پلنینگ به شناوری اطلاق می‌شود که بدون استفاده از هیچ وسیله اضافی غیر از شکل بدنه بتواند به قله اصلی مقاومت غلبه کند. توزیع فشار روی سطح خیس شده بدنه یک شناور پلنینگ با شروع حرکت تغییر می‌کند و چنانچه بدنه شناور به طور مناسبی طراحی شده باشد با افزایش سرعت شناور، نیروهای هیدرودینامیکی افزایش می‌یابند و سبب خارج شدن 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 در مرحله طراحی مفهومی دو راه وجود دارد. روش اول استفاده از راه حل‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ 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 سه بعدی با شش درجه آزادی را با استفاده از روش حجم محدود شبیه‌سازی کرده و نتایج شبیه را با نتایج آزمایش تجربی مقایسه نموده‌اند [۱]. قاسمی و غیائی یک روش ترکیبی برای تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ ارائه نمودند [۲]. در این روش با استفاده از اجزاء مرزی^۲ 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 [۳]. در این پژوهش نیز از اجزاء مرزی و تئوری لایه مرزی برای تعیین مقاومت‌های هیدرودینامیکی شناور پلنینگ استفاده شده است و تحلیل عددی ارائه شده را با داده‌های تجربی شناور پلنینگ با زاویه ددرايز متغیر مقایسه کرده‌اند که از تطابق خوبی برخوردار بوده است.

بریزولارادقت کدهای CFD را در تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ مطالعه نمود [۴]. روش‌های CFD از دقت خوبی در نتایج برخوردار می‌باشند اما این روش‌ها زمان حل نسبتاً طولانی دارند و مدل‌سازی کامپیوتری آن‌ها جهت حل هر مساله مشکل می‌باشند. استفاده از 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 [۵] که با توجه به ارتقاء یافتن کامپیوترها و کاهش زمان حل روش‌های عددی همچنان از روش‌های مرسوم در تخمین کارایی شناورهای پلنینگ محسوب می‌شود. 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. 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 [۶]. سویتسکی و همکارانش

برای اولین بار یک روش برای محاسبه درگ حاصل از اسپری آب و مقاومت ایرودینامیکی هوا به صورت تابعی از سرعت، زاویه ددرايز و زاویه تریم^۳ شناور ارائه کردند که در هیچ یک از تحقیقات قبلی این دو مولفه مقاومت در مقاومت کل بدنه شناور تندرو پلنینگ در نظر گرفته نشده بودند [۷]. همچنین در سال ۲۰۱۰ سویتسکی و مورایتوتحلیلی کامل تری در مورد سطح خیس شده اسپری و جدایش آب از بدنه شناور را ارائه نموده اند [۸]. ساواندرو رهی مقایسه ای بین نتایج حل عددی و تجربی برای مولفه های هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ انجام دادند [۹].

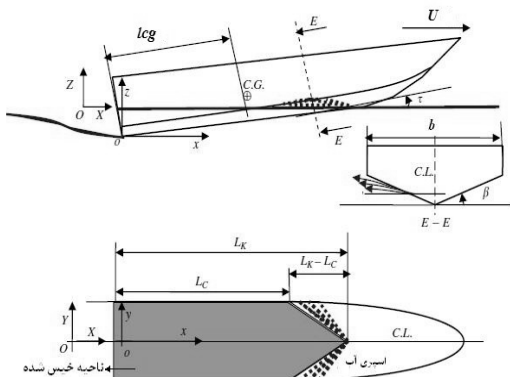
با توجه به اهمیت مقدار مقاومت شناورهای پلنینگ، بهینه سازی این شناورها نیز مورد توجه می باشد. برای این منظور مطالعات بسیار زیادی برای کاهش مقاومت هیدرودینامیکی با اضافه کردن اجزاء اضافی و تغییرات روی بدنه این شناورها انجام شده است. یاکوب و همکارانش به بررسی کاهش مقاومت شناورهای پلنینگ با اضافه کردن یک باله پاشنه بر روی بدنه، پرداختند [۱۰]. بوجویک و ساهو پاشنه و اسپری ریل^۴ را بر روی مقاومت شناورهای پلنینگ مطالعه نمودند و مقایسه ای بین ضریب مقاومت شناورهای با و بدون اسپری ریل انجام دادند [۱۱]. ناگای و همکارانش با مطالعه بر روی سیزده مدل گوناگون که دارای ترنزام، طول بدنه، تریم اولیه و ارتفاع چاین های گوناگون بودند، در جهت کمینه کردن مقاومت شناور به کمک کنترل زاویه تریم تلاش نموده اند [۱۲]. سابرامانیانو 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 بر روی یک مدل خاص با و بدون تونل در بدنه را به کمک روش های عددی تعیین نموده اند [۱۳]. یکی از پرکاربردترین پژوهش ها در زمینه پایداری دینامیکی عرضی شناور پلنینگ توسط لواندوسکی انجام شده و یک سری روابط شبه ضمنی در مورد چگونگی تغییر ارتفاع^۵ GM شناورهای پلنینگ منشوری با عرض، زاویه ددرايز، زاویه تریم، آبخور ترنزام و سرعت پیشروی، ارائه نموده است [۱۴]. گامون بهینه سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر

روش پارتو روی فرم بدنه شناور ماهیگیری تک بدنه و پارامترهایی مانند طول، عرض و ارتفاع آبخور شناور را بهینه نموده است [۱۵]. گامون مقاومت، قابلیت دریانوردی^۶ و پایداری شناور ماهیگیری را به عنوان توابع هدف در نظر گرفته است و نتایج بهینه سازی را بر روی شناور ماهیگیری واقعی بررسی کرده است.

روابط و نتایج آزمایشات نشان می دهد که پارامترهای هندسی شناور نظیر عرض شناور، زاویه ددرايز و مکان مرکز گرانش در مقدار مقاومت هیدرودینامیکی شناور موثر است. وابستگی این پارامترها با مقاومت هیدرودینامیکی به طور واضح مشخص نیست. از اینرو یکی از مشکلات موجود در طراحی این شناورها تعیین بهینه پارامترهای هندسی می باشد به گونه ای که پایداری استاتیکی و دینامیکی شناور حفظ شود. همچنین در مرحله طراحی مفهومی یکی از مهمترین مسایلی که همواره طراحان شناور با آن مواجه هستند، انتخاب مناسب ابعاد هندسی شناور به گونه ای که شناور کمترین مقاومت هیدرودینامیکی را داشته باشد و در عین حال قابلیت پایداری خود را حفظ کند، می باشد. تلاش ها و تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور را با اضافه کردن یک جزء و یا تغییر فرم بدنه دنبال می کند و فرآیند مشخصی را برای تعیین ابعاد بهینه شناور با توجه به ظرفیت و سرعت پیشروی آن ارائه نمی کنند. به عبارت دیگر تلاش هایی که تاکنون صورت گرفته بصورت موردی بوده و منجر به ارائه یک برنامه کلی برای موقعیت ها و شرایط گوناگون نشده است. از طرف دیگر در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته است بحث مقاومت هیدرودینامیکی و پایداری شناور به صورت همزمان صورت پذیرفته است و نکته قابل توجه آنکه ممکن است بهینه سازی منوط بر مقاومت هیدرودینامیکی منجر به فرم بدنه های بهینه شود که دارای پایداری استاتیکی یا خصوصاً دینامیکی نبوده و در واقعیت قابل استفاده نباشند. در نتیجه در نظر گرفتن هر کدام از این دو مبحث به تنهایی ممکن است منجر به معرفی محصول بهینه مورد اطمینان نگردد.

۲- معادلات هیدرودینامیکی حاکم

شناورهای مورد استفاده در این مقاله دارای بدنه‌های منشوری می‌باشند. با توجه به شکل ۱ پارامترهای هندسی شناورتندرو پلنینگ به شرح زیر می‌باشند:



شکل ۱- پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی شناورهای پلنینگ [۲]

۲-۱- مقاومت هیدرودینامیکی

در این مقاله مقاومت هیدرودینامیکی (R_h) برای بدنه شناور تندرو به دو بخش مقاومت فشاری (R_p) و مقاومت اصطکاکی (R_f) تقسیم می‌شود. این دو مقاومت نسبت به دیگر مقاومت‌های هیدرودینامیکی مانند مقاومت هوا، شکست امواج و موج‌ساز باز اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند.

$$R_h = R_p + R_f \quad (1)$$

۲-۱-۱- مقاومت فشاری

با تعیین زاویه تریم توسط روش نیمه تجربی سویتسکی، مقاومت فشاری براساس وزن شناور (Δ) برابر است با:

$$R_p = \Delta \tan \tau \quad (2)$$

τ زاویه تریم بوده و با انتگرالگیری، تنش‌های مماسی وارد بر بدنه در جهت حرکت محاسبه می‌شود.

در این مقاله، برای اولین بار با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه مقاومت هیدرودینامیکی شناور با حفظ پایداری استاتیکی و دینامیکی آن کمینه گردد. بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو انجام پذیرفته و پارامترهای هندسی عرض آبخوار، زاویه ددرایز و طول مرکز گرانش به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی مورد نظر قرار گرفته شده است. در انتها برای سرعت‌های (اعداد فرود حجمی) مختلف، پارامترهای هندسی بهینه بدنه که شناور دارای کمترین مقدار مقاومت هیدرودینامیکی بوده، ارائه شده است. همچنین برای هر سرعت مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی بهینه به همراه مقدار توابع هدف آورده شد که به طراحان کمک می‌کند که براساس شرایط و نیازهای مورد نظر خود بدنه بهینه را انتخاب کنند. لازم به ذکر است این فرآیند را می‌توان برای هر شناور پلنینگ دلخواه با توجه به ظرفیت و سرعت پیشروی آن اعمال نمود. نزدیک‌ترین پژوهش به پژوهش حاضر، مقاله گامون در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه روی فرم بدنه شناور ماهیگیری می‌باشد که در عدد فرود حجمی ۰/۶ انجام گرفته است [۱۵] که از پژوهش‌های جدید انجام شده در زمینه بهینه‌سازی فرم بدنه شناورهای تک‌بدنه می‌باشد. حال آنکه پژوهش حاضر در اعداد فرود حجمی ۲ انجام شده است با بالا رفتن سرعت پایداری و قابلیت دریانوردی شناور تندرو از اهمیت بالاتری برخوردار شده و به تغییر سرعت حساس‌تر می‌شوند.

در بخش دوم معادلات حاکم بر تخمین مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای تندرو تک بدنه شرح داده شده، در بخش سوم پایداری‌ها استاتیکی و دینامیکی و معادلات حاکم توضیح داده شده است که پایداری دینامیکی به دو بخش ناپایداری پورپوزینگ و پایداری دینامیکی مارپیچ (پایداری دینامیکی عرضی) تقسیم می‌شود. در بخش چهارم به اعتبارسنجی کد نوشته شده جهت استفاده در فرآیند بهینه‌سازی ارائه شده است. در بخش پنجم به بیان شرایط اجراء بهینه‌سازی چند هدفه و نتایج حاصل از آن پرداخته شده است.

۲-۱-۲- مقاومت اصطکاکی

مقاومت اصطکاکی مؤلفه‌ای از مقاومت کشتی است. همه سیالات، دارای لزجت هستند که باعث بوجود آمدن اصطکاک می‌شود. اهمیت اصطکاک فوق بستگی به نوع سیال و مشخصه های جریان دارد. در عمل برای تعیین مقاومت اصطکاکی شناورها از ضریب مقاومت اصطکاکی (C_f) استفاده می‌شود. C_f در سال ۱۹۵۷ پیشنهادهای زیادی را مورد بررسی قرار داد و رابطه زیر را بهترین رابطه تشخیص داد:

$$C_f = 0.0004 + \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (3)$$

که در آن $R_n = \frac{U_1 \lambda b}{\nu}$ عدد رینولدز بوده و U_1 سرعت سیال در کف شناور (کوچک‌تر از سرعت شناور است) و λ نسبت طول متوسط خیس شده به عرض شناور می‌باشد. در نهایت مولفه مقاومت اصطکاکی شناورهای پلنینگ به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$R_f = \frac{C_f \rho U_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos \beta \cos \tau} \quad (4)$$

که β زاویه ددرایز در مرکز گرانش، ρ چگالی آب می‌باشد. سویتسکی مقدار U_1 را به صورت زیر معین کرد [۵]:

$$\frac{U_1}{U} = \sqrt{1 - \frac{0.012 \tau^{1.1}}{\lambda^{0.5} \cos \tau} f(\beta)} \quad (5)$$

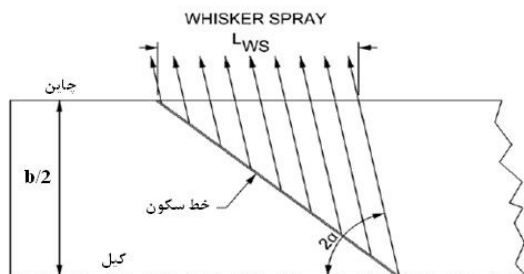
مقدار $f(\beta)$ برای سطوح پلنینگ با زاویه ددرایز غیر صفر در مرجع [۵] به صورت نمودار ارائه شده است.

۳-۱-۲- مقاومت اسپری آب

نمای شماتیک از سطح خیس شده بدنه حاصل از اسپری آب در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ خط سکون^۱، خطی فرضی می‌باشد که در سرعت‌های زیاد آب بالا آمده بر روی بدنه از آن جدا می‌شود، L_{ws} طول متوسط سطح خیس شده حاصل از اسپری آب،

α زاویه بین خط کیل بدنه و اسپری آب می‌باشد و اسپری آب‌های جدا شده از بدنه اصطلاحاً Whisker Spray گفته می‌شود. مساحت خیس شده سطح حاصل از اسپری آب (A_{as}) به صورت زیر نشان داده می‌شود [۷].

$$A_{as} = \frac{b^2}{4 \sin 2\alpha \cos \beta} \quad (6)$$



شکل ۲- سطح خیس شده بدنه حاصل از اسپری آب در سطح آب‌خور [۸]

با داشتن سطح خیس شده حاصل از اسپری آب در رابطه (۶)، مقاومت اسپری آب به صورت زیر تعیین می‌شود [۷].

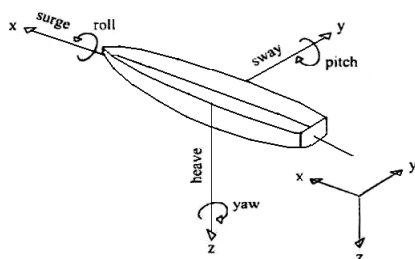
$$R_s = \frac{1}{2} \rho U^2 C_{fs} A_{as} \quad (7)$$

C_{fs} ضریب اصطکاک اسپری می‌باشد. البته هنوز هیچ روش جهت 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 بدست آمده برای C_{fs} براساس نتایج تست مدل می‌باشد و قابل تعمیم برای نمونه واقعی نمی‌باشد.

رخ می‌دهد و تابعی از سرعت شناور می‌باشد. توضیحات بیشتر در مورد این ناپایداری در مرجع [۵] ارائه شده است.

۳-۳- پایداری دینامیکی مارپیچ

در ناپایداری مارپیچ باید معادله حرکت در راستای جانبی و معادلات مومنتم را حول محور x (غلتش حول محور طولی^{۱۵}) و z (گردش جانبی^{۱۶}) و اثرات آن‌ها روی هم را در نظر گرفت. دستگاه مختصات به صورت شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- دستگاه مختصات تعریف شده برای شناور [۱۴]

برای بررسی پایداری دینامیکی، معادله درجه چهار به صورت زیر حاصل می‌شود (s متغیری مختلط) [۱۴].

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (11)$$

ضرایب A, B, C, D و E در مرجع [۱۷] ارائه شده است. رابطه (۱۱) 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 معادله منفی باشد.

۴- اعتبار سنجی کد نوشته شده

قبل از پرداختن به بحث بهینه‌سازی به اعتبار سنجی کد نوشته شده براساس روش نیمه تجربی سویتسکی برای محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی و پایداری دینامیکی مارپیچ براساس پژوهش لواندوسکی پرداخته می‌شود. زیرا در هر دو مبحث مجموع وسیعی از روابط مورد استفاده قرار

۳- پایداری بدنه شناور تندرو پلنینگ

برای رسیدن به کمترین مقاومت هیدرودینامیکی و داشتن بدنه ایده‌آل در سرعت‌های بالا باید پایداری شناور نیز مورد بررسی قرار گیرد و به هر اندازه که پایداری شناور در سطح بالاتری باشد اطمینان به بدنه بالاتر می‌رود.

۳-۱- پایداری هیدرواستاتیکی

برای ارزیابی پایداری شناور، ابتدا باید تعادل آن در حالت سکون (سرعت صفر) بررسی گردد. مقدار GM از رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۶].

$$GM = KB + BM - KG \quad (8)$$

KG فاصله مرکز گرانش تا کیل بدنه شناور می‌باشد. KB ارتفاع مرکز شناوری در بالای کیل بوده و با توجه به مرکز هندسی سطح مقطع خیس شده قابل محاسبه می‌باشد [۱۶].

$$KB = \frac{5}{6} D_i - \frac{\nabla}{3A_w} \quad (9)$$

D_i آب‌خور شناور در حالت سکون و A_w مساحت صفحه آب‌خور می‌باشد. BM با در نظر گرفتن مشخصات هندسی به صورت زیر معین می‌گردد.

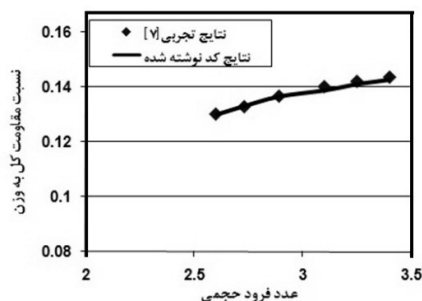
$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (10)$$

I ممان دوم عرضی صفحه آب‌خور حول خط مرکزی^{۱۱} می‌باشد.

۳-۲- ناپایداری پورپویزینگ^{۱۲}

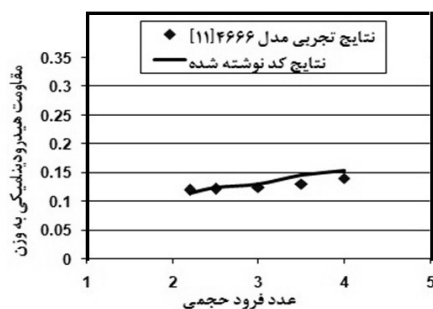
پورپویزینگ حاصل ترکیب حرکات عمودی^{۱۳} و غلتش حول محور عرضی^{۱۴} شناور می‌باشد. علت این نام‌گذاری به این دلیل می‌باشد که حرکت شناور در آب هنگامی که دچار این ناپایداری می‌گردد، شبیه حرکت موجودی به نام پورپویز می‌شود و شناور شروع به بالا و پایین رفتن در آب می‌کند. این ناپایداری متناوب دینامیکی در آب‌های آرام و در غیاب تحریک خارجی

در شکل ۴ تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از کد ارائه شده برای مقاومت هیدرودینامیکی نسبت به وزن به اعداد فرود حجمی مختلف برای شناور A نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه بین نسبت مقاومت به وزن شناور A برای کد استفاده شده و نتایج تجربی

در شکل ۵ نیز برای شناور B تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از کد ارائه شده برای مقاومت به وزن در اعداد فرود حجمی مختلف دیده می شود.



شکل ۵- مقایسه بین نسبت مقاومت به وزن شناور B برای کد استفاده شده و نتایج تجربی

جهت اعتبار سنجی روابط مربوط به محاسبه ناپایداری عرضی از نتایج تجربی ارائه شده توسط لواندوسکی در سال ۱۹۹۷ استفاده می شود [۱۴]. در شکل ۶ تطابق خوبی بین روابط پایداری عرضی مورد استفاده با نتایج تجربی دیده می شود.

می گیرد که بعضاً در مراجع به اشتباه ضرایب هیدرودینامیکی مورد استفاده، ارائه شده است که می تواند اعتبار نتایج بهینه سازی پژوهش حاضر را متزلزل نماید (برای مثال به مرجع [۱۷] مراجعه نمایید). در این بخش با اعتبار سنجی انجام شده روی روش های مورد استفاده در کد، دقت در محاسبات و درستی ابزار اولیه جهت انجام بهینه سازی بررسی شده است. سویتسکی برای محاسبه $f(\beta)$ نموداری ارائه نموده است که در هر زاویه ددرایز (β) در زاویه تریم-های (τ) مختلف براساس نسبت متوسط طول خیس شده به عرض شناور (λ) می توان نسبت U_1/U را مشخص نمود. در کد مورد استفاده به دلیل نیاز به رابطه ریاضی نسبت U_1/U برای انجام بهینه سازی با توجه به اطلاعات موجود و استفاده از روش پاسخ سطح به صورت زیر تقریب زده شده است.

$$f(\beta) = 0.0127\lambda^2 + 0.125\lambda\tau - 0.22\lambda + 0.05\tau - 0.05\beta + 1.30 \quad (12)$$

کد ارائه شده برای مقاومت هیدرودینامیکی دو شناور تندرو پلنینگ مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج آن با نتایج حاصل از آزمایش تجربی در حوضچه کشش بر روی این دو شناور مقایسه شده است. مشخصات این دو شناور در جدول ۱ آورده شده است. شناور A مشخصات شناوری می باشد که توسط سویتسکی در سال ۲۰۰۷ مورد آزمایش قرار گرفته است [۷] و شناور B مشخصات شناور مدل ۴۶۶۶ از سری ۶۲ می باشد [۶].

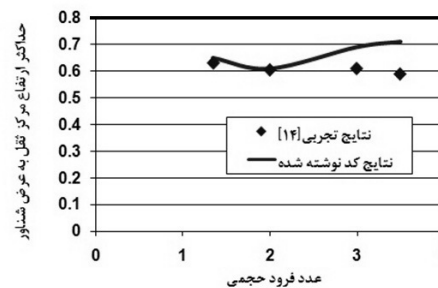
جدول ۱- مشخصات شناورهای تندرو پلنینگ جهت اعتبارسنجی

مشخصات	شناور A [۷]	شناور B [۶]
وزن جابجایی $\Delta(ton)$	۵۲/۱۶	۴۵
فاصله مرکز گرانش تا ترنزام $l_{cg} (m)$	۸/۳۸	۹/۰۷
عرض شناور $b(m)$	۴/۹۴	۷/۰۲
زاویه ددرایز $\beta(deg)$	۱۸/۵	۱۲/۵
مقیاس مدل	۱۲	۱۲

جدول ۲- تنظیمات اجرای برنامه الگوریتم ژنتیک در

نرم افزار MATLAB

گزینه در MATLAB	مقدار	توضیحات
Generations	۳۰	عددی مثبت که حداکثر تعداد تولید نسل می باشد
Population Size	۱۵	بیانگر تعداد جمعیت جامعه در هر نسل می باشد
Stall Time Limit	۱۰	چنانچه برنامه هیچ بهبودی در تابع هدف برای این تعداد تولید نسل- مشاهده نکند، متوقف می شود
TolFun	۰/۰۰۱	برای این تنظیمات چنانچه بهبود در مقدار تابع برازندگی در ۱۰ نسل متوالی کمتر از ۰/۰۰۱ باشد، برنامه متوقف خواهد گردید.
Pareto Fraction	۰/۷	عددی بین ۰ و ۱ که هر چه بزرگتر باشد، برنامه تعداد جمعیت بیشتری از اولین نمودار پارتو را در تولید نسل بعدی دخیل می کند.



شکل ۶- مقایسه نتایج تجربی و روابط مورد استفاده برای پایداری عرضی

علت افزایش خطای محاسبات با ازدیاد عدد فروود، بزرگتر شدن حرکات جانبی و گردش شناور در سرعت های بالا و چشمگیرتر شدن نقش این حرکات در واژگون کردن شناور می باشد.

۵- بهینه سازی چند هدفه

همانطور که بیان شد، برای رسیدن به یک جواب قابل قبول که از لحاظ مقاومت هیدرودینامیکی و تعادل استاتیکی و دینامیکی بهینه است، نیاز است از بهینه سازی چند هدفه بهره برده شود، تا همزمان هر دو تابع هدف مورد توجه قرار گیرند. روش های بهینه سازی چند تابع هدفه همانند بهینه سازی تک تابع هدفه متفاوت می باشند. از بین روش های موجود، از بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو بهره برده شد. زیرا این روش به خوبی تمام فضای طراحی را پوشش می دهد و امکان توقف آن در نقاط مینیمم محلی نیز بسیار اندک است. نکته حائز اهمیت در ارتباط با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین مقدار مناسب تعداد جمعیت، تعداد تولید نسل، معیار توقف و میزان دخالت نسل قبلی در تولید نسل بعدی می باشد. مقادیر مناسب این پارامترها که برای حل در نظر گرفته شده در جدول ۲ آمده است. برای انجام بهینه سازی نیاز است توابع هدف، متغیرها و قیود مسئله تعریف شوند که در ادامه توضیح داده می شوند.

با توجه به اجراهای متعدد برنامه مشخص شد که الگوریتم معمولاً در حدود ۲۰ چرخه ابتدایی به جواب می رسد، لذا جهت اطمینان تعداد تولید حلقه ها برابر ۳۰ در نظر گرفته شد (Generations=30). اندازه جمعیت نوعاً وابسته به مساله است و به صورت تجربی با توجه به تعداد متغیرهای طراحی و بازه انتخاب آنها مشخص می شود. اما معمولاً تعداد جمعیت اولیه را حدود ۳ تا ۶ برابر تعداد متغیرها در نظر می گیرند و از آنجا که ۳ پارامتر طراحی در این مساله وجود دارد باید تعداد جمعیت هر نسل را حدود ۹ تا ۱۸ فرض نمود که با توجه به سرعت و دقت همگرایی در نهایت تعداد جمعیت هر نسل برابر ۱۵ قرار داده شد (PopulationSize=15). شرط توقف برنامه مقدار نزدیکی نتیجه حاصل از هر نسل به نسل قبلی برای توابع هدف می باشد. حال آنکه منظور از نزدیک بودن نتیجه نسل ها برای توابع هدف چقدر می باشد و این نزدیک بودن برای چند بار باید اتفاق بیفتد (زیرا ممکن است بصورت تصادفی میزان تابع هدف در یک نسل بسیار نزدیک هم باشند)؟ با توجه به آنکه مقدار تابع هدف حدود ۰/۱ می باشد مقدار تغییرات در تابع هدف ۰/۰۰۱ فرض گردید (TolFun=0.001). برای آنکه

۵-۲- قیود بهینه سازی

برای روش نیمه تجربی سویتسکی و پایداری عرضی محدودیت‌هایی وجود دارد که جزء اولین قیود مسئله می‌باشند.

(۱۴)

$$1 \leq \lambda \leq 5$$

$$0 \leq \tau \leq 6$$

$$10 \leq \beta \leq 30$$

$$0.077 \leq \frac{D_t}{b} \leq 0.408$$

برای قید پایداری هیدرواستاتیکی همانند مطالب ذکر شده در بخش ۳-۱ در نظر گرفته و جهت اطمینان از پایداری شناور $GM > 0.5$ قرار داده می‌شود.

برای قید عدم ناپایداری پورپویزینگ و تعیین زاویه تریم بحرانی (τ_{cr}) که در این زاویه پورپویز رخ می‌دهد براساس اطلاعات موجود و روش پاسخ سطح به صورت زیر تخمین زده شده است.

(۱۵)

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

به منظور عدم رخداد پورپویزینگ، تریم شناور باید کمتر از مقدار بحرانی (τ_{cr}) آن باشد و به منظور رعایت اطمینان بیشتر یک درجه از تریم بحرانی کاسته شده است.

$$\tau \leq \tau_{cr} - 1 \quad (16)$$

آخرین قید مورد بررسی مربوط به پایداری دینامیکی مارپیچ می‌باشد که مطالب ذکر شده بخش ۳-۳ برای این قید مدنظر قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده مساله بهینه سازی به صورت زیر خواهد بود:

احتمال تصادفی بودن نزدیکی جواب‌ها کاهش یابد میزان تکرار الگوریتم در صورت عدم بهبود جواب‌ها برابر ۱۰ معین گردید ($StallTimeLimit=10$). ParetoFraction عددی اسکالر بین ۰ تا ۱ می‌باشد که هر چه به یک نزدیکتر باشد جواب‌های بهینه بیشتری از نسل قبل در تولید نسل جدید استفاده می‌شود. چنانچه عدد در نظر گرفته شده خیلی کوچک باشد سرعت همگرایی الگوریتم کاهش می‌یابد و ممکن است تعداد جواب‌های نهایی نمودار پارتو به اندازه کافی نباشد و چنانچه عدد مذکور خیلی نزدیک ۱ باشد امکان افتادن در یک مینیمم محلی افزایش می‌یابد. با توجه به موارد مطروحه مقدار این پارامتر برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد ($ParetoFraction=0.7$).

۵-۱- توابع هدف

در بهینه سازی دو تابع هدف در نظر گرفته شده است، تابع هدف اول نسبت مقاومت اصطکاکی و فشاری به وزن شناور و تابع هدف دوم نسبت مساحت سطح اسپری آب به حجم جابجایی به توان $\frac{2}{3}$ در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات انتهایی بخش ۲-۱-۳ در نظر گرفتن مستقیم مولفه مقاومت اسپری آب در تابع هدف امکان‌پذیر نیست. به طور کلی این مولفه از مقاومت نسبت به سایر مولفه‌های مقاومت از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد، اما در زوایای تریم خیلی کوچک، زوایای ددرايز بزرگ و در سرعت‌های بالا مقدار مولفه می‌تواند حتی تا ۱۵ درصد مقاومت کل شناور افزایش یابد. اما با توجه به رابطه (۷) مشخص است که با بهینه سازی سطح خیس شده حاصل از اسپری آب (A_{as}) به نوعی می‌توان مقاومت اسپری آب را برای یک شناور تندرو بهینه نمود (با ثابت فرض کردن سرعت و C_{fs} در این مقاومت). مساله بهینه‌سازی در آب‌های آرام در یک سرعت و وزن جابجایی مشخص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1, f_2 \\ f_1 = \quad & \frac{R_h}{\Delta} = \frac{R_f + R_p}{\Delta} \\ f_2 = \quad & \frac{A_{spray}}{\nabla^{2/3}} \end{aligned} \quad (13)$$

(۱۷)

$$\min f_1, f_2$$

$$f_1 = \frac{R_f + R_p}{\Delta}$$

$$f_2 = \frac{A_{\text{spray}}}{\nabla^{2/3}}$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} 0.6 \leq C_v \leq 25 \\ 2 \leq \tau \leq 6 \\ 1 \leq \lambda \leq 4 \\ 0.077 \leq \frac{D_t}{b} \leq 0.408 \\ GM > 0.5 \\ \tau \leq \tau_{cr} - 1 \end{cases}$$

[Transverse Stability (Eq.11)]

Design Variables: l_{cg}, b, β

همان‌طور که در رابطه (۱۷) مشخص می‌باشد، متغیرهای طراحی طول مرکز گرانش (l_{cg})، عرض شناور (b) و زاویه ددرایز (β) می‌باشد. بهینه‌سازی در سه وزن مختلف (۱۱ تن، ۲۷/۲ تن و ۴۳/۰۹ تن) انجام پذیرفته است. قبل از ارائه نتایج بهینه‌سازی تغییرات تابع هدف و برخی قیود با متغیرها بررسی می‌شود. شکل ۷ کانتورهای مقاومت کل (فشاری و اصطکاکی) بدون بعد و مساحت ناحیه اسپری بدون بعد که در اصل توابع هدف می‌باشند، را برای تغییرات طول مرکز گرانش، عرض شناور و زاویه ددرایز نشان می‌دهد. به طور کلی از شکل ۷ نکات زیر مشهود است:

- با افزایش هر یک از پارامترهای طراحی به تنهایی، مقدار مقاومت کل افزایش می‌یابد، اما با افزایش همزمان طول مرکز گرانش و عرض شناور به طور همزمان در برخی از موارد ممکن است سبب کاهش مقدار مقاومت گردد (نمودار سوم الف).
- هر چه زاویه ددرایز بزرگتر گردد شیب تغییرات افزایش مقاومت نیز بزرگتر می‌شود (خطوط کانتورها به هم نزدیک‌تری شوند).
- مساحت سطح اسپری در زوایای ددرایز کوچک تقریباً مستقل از آن (زاویه ددرایز)

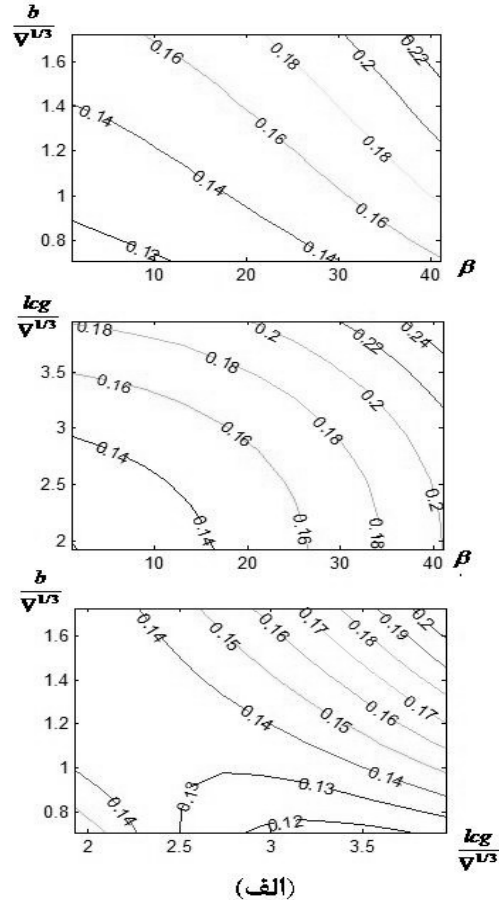
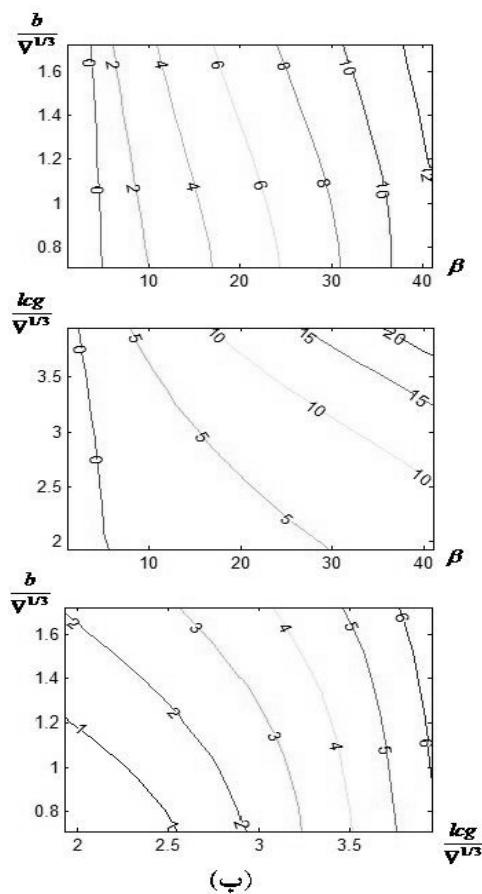
می‌باشد. اما با افزایش مقدار آن به شدت بر روی مقدار مساحت اسپری تاثیر گذار است.

- با ترکیب مناسبی از متغیرهای طراحی می‌توان به سطح اسپری صفر نیز رسید که البته ممکن است در این نقاط قیود دیگر طراحی نقض گردند. با افزایش طول شناور، تاثیر عرض شناور بر روی میزان سطح اسپری کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر در شناورهای کوتاه عرض شناور تاثیر بسزائی در مقاومت اسپری دارد (نمودار سوم ب).

پر واضح است که به دلیل این که از روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو استفاده شده است در نهایت مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به عنوان نتیجه بهینه‌سازی بدست خواهد آمد. براساس نیاز و شرایط کاربری، طراح می‌تواند از بین مجموعه جواب‌های بهینه ارائه شده بدنه مناسب با کمترین مقاوت به وزن با حفظ قیود ذکر شده را انتخاب نماید. نتایج بهینه‌سازی در هر یک از سه وزن ۱۱، ۲۷/۲ و ۴۳/۰۹ تن در عدد فرود حجمی ۲ به ترتیب در جداول ۳، ۴ و ۵ و شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ارائه شده به گونه‌ای نوشته شده است که علاوه بر وزن‌های بهینه شده قادر است پارامترهای هندسی بهینه را برای وزن‌های جابجایی و سرعت‌های پیشروی دیگر نیز ارائه دهد.

جدول ۳- مجموعه جواب‌های بهینه برای شناور با وزن ۱۱ تن

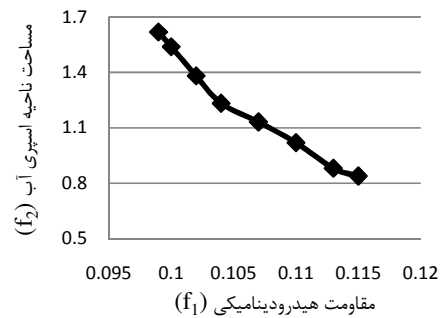
f_2	f_1	$\frac{l_{cg}}{b}$	β	$\frac{b}{\nabla^{1/3}}$	$\frac{l_{cg}}{\nabla^{1/3}}$
۱/۰۶۴	۰/۰۹۱	۱/۶۵	۱۴/۸	۱/۶۰	۲/۶۴
۰/۰۹۸	۰/۰۹۳	۱/۶۰	۱۴/۸	۱/۶۱	۲/۵۷
۰/۸۵۱	۰/۰۹۷	۱/۵۴	۱۴/۸	۱/۶۱	۲/۴۷
۰/۷۰۴	۰/۱۰۳	۱/۴۵	۱۴/۸	۱/۶۱	۲/۳۴
۰/۶۲۷	۰/۱۰۶	۱/۴۱	۱۴/۸	۱/۶۱	۲/۲۷
۰/۵۳۰	۰/۱۱۲	۱/۳۵	۱۴/۸	۱/۶۱	۲/۱۸
۰/۴۴۷	۰/۱۱۸	۱/۳۱	۱۴/۸	۱/۶۰	۲/۱۰
۰/۳۲۹	۰/۱۳۱	۱/۱۷	۱۴/۸	۱/۶۵	۱/۹۳



شکل ۷- الف: کانتورهای مقاومت $f_1 = \frac{R_f + R_p}{\Delta}$ ب: کانتورهای سطح اسپری آب $f_2 = \frac{A_{spray}}{\frac{2}{\nabla^{1/3}}}$

جدول ۴- مجموعه جواب‌های بهینه برای شناور ۲۷/۲ تن

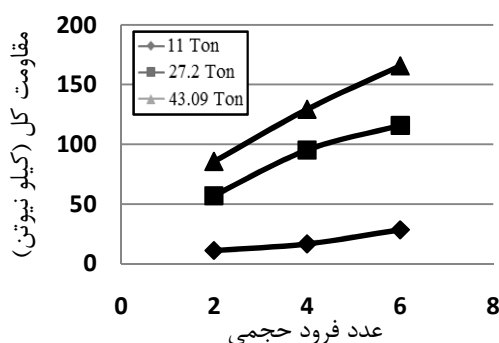
f_2	f_1	$\frac{lcg}{b}$	β	$\frac{b}{\nabla^{1/3}}$	$\frac{lcg}{\nabla^{1/3}}$
۱/۲۳	۰/۱۰۴	۱/۳۰	۱۵/۶	۱/۸۹	۲/۴۵
۱/۵۴	۰/۱	۱/۳۷	۱۵/۵	۱/۹۰	۲/۶۱
۱/۶۲	۰/۰۹۹	۱/۴۰	۱۵/۴	۱/۹۰	۲/۶۶
۰/۸۸	۰/۱۱۳	۱/۱۹	۱۵/۵	۱/۸۷	۲/۲۳
۱/۰۲	۰/۱۱	۱/۲۱	۱۵/۴	۱/۹۰	۲/۳۰
۱/۱۳	۰/۱۰۷	۱/۲۵	۱۵/۵	۱/۹۰	۲/۳۸
۱/۳۸	۰/۱۰۲	۱/۳۴	۱۵/۵	۱/۸۹	۲/۵۴
۰/۸۴	۰/۱۱۵	۱/۱۷	۱۵/۸	۱/۸۶	۲/۱۹



شکل ۸- تغییرات تابع هدف f_2 بر حسب تابع هدف f_1 برای شناور ۱۱ تن

براساس جداول و شکل‌ها مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه در اختیار می‌باشد و طراح علاوه بر شرایط کاربری با توجه به اهمیت هر کدام از توابع هدف می‌تواند ابعاد هندسی بهینه را برای طراحی شناور مدنظر برگزیند. همانطور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشخص می‌باشد هنگامی که مقاومت به وزن کم، سطح خیس شده اسپری زیاد می‌باشد و بالعکس.

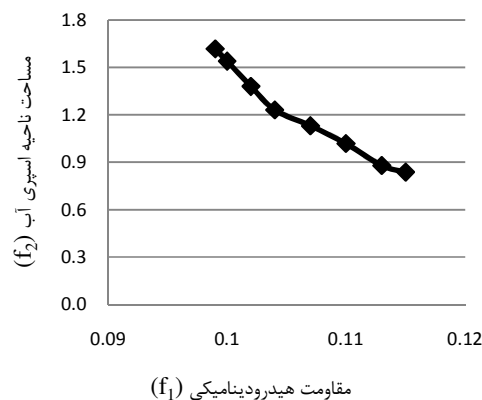
در شکل ۱۱ مقاومت بهینه شناور (کمترین مقاومت) در مقابل افزایش عدد فرود برای ظرفیت‌های مختلف شناور رسم شده است.



شکل ۱۱- نمودار مقاومت بهینه برای ظرفیت‌های جابجایی‌های مختلف در سرعت‌های گوناگون

۶- نتیجه گیری

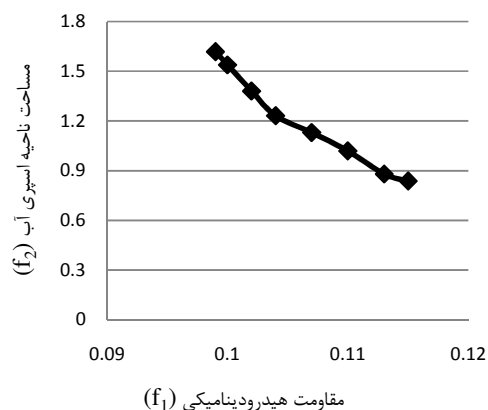
در پژوهش حاضر به بهینه سازی چند هدفه هندسه بدنه شناور تندرو پلنینگ به کمک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر روش پارتو پرداخته شد و خروجی بهینه سازی به جای ختم شدن به یک جواب به مجموعه از جواب‌های بهینه ختم می‌شود که طراح با در نظر گرفتن اهمیت هر کدام از توابع هدف در مساله مورد نظر خود می‌تواند جواب مناسب را برگزیند. دو تابع هدف در نظر گرفته شده رفتاری معکوس در جهت بهینه شدن دارند و با کاهش یکی از توابع دیگری افزایش می‌یابد که اهمیت انتخاب براساس نیاز طراح را نشان می‌دهد. در مسیر انجام بهینه‌سازی قیود همچون محدودیت‌های حاکم بر روش نیمه تجربی سویسکی، پایداری هیدرواستاتیکی، عدم ناپایداری پورپویزینگ و پایداری دینامیکی مارپیچ مورد نظر قرار گرفته است که به اعتبار جواب‌های بهینه افزوده است. برای محاسبه



شکل ۹- تغییرات تابع هدف f_2 بر حسب تابع هدف f_1 برای شناور ۲۷/۲ تن

جدول ۵- مجموعه جواب‌های بهینه برای شناور ۴۳/۰۹ تن

f_2	f_1	$\frac{lcg}{b}$	β	$\frac{b}{\nabla^{1/3}}$	$\frac{lcg}{\nabla^{1/3}}$
۰/۵۱۲	۰/۰۹۷	۱/۴۵	۱۱/۱	۱/۶۳	۲/۳۷
۰/۶۸۰	۰/۰۹۲	۱/۵۳	۱۱/۵	۱/۶۴	۲/۵۰
۰/۱۲۳	۰/۱۲۵	۱/۱۹	۱۰/۸	۱/۶۳	۱/۹۴
۰/۵۸۲	۰/۰۹۴	۱/۵۰	۱۱/۰	۱/۶۳	۲/۴۵
۰/۳۹۰	۰/۱۰۵	۱/۳۶	۱۱/۲	۱/۶۴	۲/۲۳
۰/۲۲۶	۰/۱۱۶	۱/۲۶	۱۱/۰	۱/۶۳	۲/۰۵
۰/۳۰۲	۰/۱۰۸	۱/۳۲	۱۰/۸	۱/۶۳	۲/۱۶
۰/۷۸۲	۰/۰۸۹	۱/۶۰	۱۱/۴	۱/۶۳	۲/۶۰



شکل ۱۰- تغییرات تابع هدف f_2 بر حسب تابع هدف f_1 برای شناور ۴۳ تن

characteristics", University of Genoa, Department of Naval Architecture and Marin Technology, Italy.

5-Savitsky, D., (1964), "Hydrodynamic design of planning hull", Marine Technology, Vol. 1, No. 1, pp.71-95.

6-Clement, E.P., Blount, D.L., (1963), "Resistance Test of Systematic Series of Planning Hulls Forms", SNAME Transaction (71), pp.491-579.

7-Savitsky D., Delorme M. L., Delta R., (2007), "Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planning Hulls", Marine Technology, Vol. 44, No. 1, pp. 35-56, January.

8-Savitsky, D., Morabito, M., (2010), "Origin and Characteristics of the Spray Patterns Generated by Planning Hulls", Davidson Laboratory, Report 2882, Stevens Institute of Technology.

9-Savander, B.R., Rhee, S.H., (2003), "Steady Planning Hydrodynamics: Comparison of Numerical and Experimental Results", Fluent Users' Group Manchester, NH.

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

11-Bojovic, P., Sahoo, P.K., (1996), "Effect of Stern Wedges and Advanced Spray Rail System on Calm Water Resistance of High Speed Displacement", AMECRC Internal Report 95/5, pp. 1-93.

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

13-Subramanian, V.A., Subramanyam, P.V.V., Sulficker, N., (2007), "Pressure and drag influences due to tunnels in high-speed planning craft", International Shipbuilding Progress 54, pp.25-44.

14-Lewandowski, E.M., (1997), "Transverse Dynamic Stability of Planing Craft", Marine Technology, Vol. 34, No. 2, pp.109-118, April.

15-Gammon, M., (2011), "Optimization of Fishing Vessel Using a Multi Objective Genetic Algorithm", Ocean Engineering, Vol. 38, pp. 1054-1064.

زاویه تریم بحرانی در قید پورپوزینگ رابطه تخمین زده شده است که با نتایج دیگر مراجع نیز تطابق مناسبی دارد. محدوده تغییرات بهینه برای طول مرکز گرانش و عرض بدنه به کعب حجم بدنه $(\frac{lcg}{\nabla^{1/3}})$ و $(\frac{b}{\nabla^{1/3}})$ در دریای آرام به ترتیب بین ۱/۹ تا ۲/۶۶ و ۰/۸۹ تا ۱/۹ می باشد. زاویه ددرايز بهینه در هر حالت مورد بررسی تغییرات زیادی در بین مجموعه جوابها بهینه حاصل از روش پارتو ندارد و تقریباً مقدار ثابتی دارد.

کلید واژگان

- 1-Computational Fluid Dynamics(CFD)
- 2-Boundary Element Method (BEM)
- 3-Trim angle
- 4-Spray Rail
- 5-Metacenter
- 6-Seakeeping
- 7-Pressure Resistance
- 8-Frictional Resistance
- 9-International Towing Tank Conference
- 10-Stagnation Line
- 11-Center Line
- 12-Porpoising
- 13-Heave
- 14-Pitch
- 15-Roll
- 16-Yaw

۷- مراجع

- 1-Panahi, R., Jahanbakhsh, E., Seif, M.S., (2009), "Towards Simulation of 3D Nonlinear High-Speed Vessels Motion", Ocean Engineering, Vol. 36, pp. 256-265.
- 2-Ghassemi, H., Ghiasi, M., (2007), "A Combined Method for the Hydrodynamic Characteristics of Planning Crafts". Ocean Engineering, Vol.35, November, pp. 310-322.
- 3-Kohansal, A.R., Ghassemi, H., (2010), "A Numerical Modeling of Hydrodynamic Characteristics of Various Planing Hull Forms", Ocean Engineering, Vol.37, pp. 498-510.
- 4-Brizzolara, S., Serra, F., (1997), "Accuracy of CFD codes in the prediction of Planning surfaces hydrodynamic

16-Seif, M., Seif, M.S., (1985)“Fundamental of Ship Design”, Amirkabir Univ. Publishing Co. (Tafresh branch), pp. 5-8, Iran, (In Persian).

17-Tavakoli Dakhrabadi, M., Amini, E., Mehrizi, A. (2011), “Investigation of physical Characteristics Effecton Transverse Dynamic Stability forHigh Speed Vessel in Planning State”, 13th Marine Industries Conference, Kish Island, Iran, (In Persian).