

طراحی پروانه‌های دریایی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات با گروه‌های مستقل به منظور بهبود بازده و کاهش کاویتاسیون

سید محمدرضا موسوی^۱، محمد خویشه^۲، رسول کریمی^۳، رحیم مالمیر^۴

m_mosavi@iust.ac.ir

۱ و ۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک
۳ و ۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

چکیده

با توجه به وجود پارامترهای بسیار زیاد موثر در طراحی، وجود چندین هدف متناقض با هم و شرایط ناپایدار و بسیار پیچیده محیطی، طراحی پروانه‌های دریایی به یکی از موضوعات چالش برانگیز برای طراحان و محققان این حوزه تبدیل شده است. امروزه الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان یکی از راه‌حل‌های بسیار کارآمد برای حل مسایل پیچیده‌ی مهندسی بکار می‌روند. در این مقاله به منظور طراحی پروانه‌های دریایی برای اولین بار از الگوریتم IGPSO استفاده شده است. بدین منظور دو هدف حداکثر بازده و حداقل کاویتاسیون (که با یکدیگر در تضاد هستند) به عنوان تابع شایستگی در نظر گرفته شده‌اند. برای این کار تاثیر دو پارامتر مهم وتر و ضخامت پروانه طی چندین آزمایش در تابع شایستگی محاسبه شده و توسط الگوریتم IGPSO بهینه‌ترین حالت انتخاب شده است. به منظور مقایسه نتایج، از الگوریتم‌های معیار PSO و GA استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پروانه با ۵ یا ۶ پره که سرعت عملکرد بین ۱۸۰ تا ۱۹۰ RPM دارد، کمترین سطح نویز تولیدی را دارد. پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO در حالت بدون کاویتاسیون ۸۶/۶۴ dB و در حالت با کاویتاسیون ۱۰۶/۷۹ dB نویز تولید می‌کند که نسبت به بهترین الگوریتم مورد مقایسه به ترتیب ۱/۲۴ dB و ۰/۸۰ dB نویز کمتری را به وجود می‌آورد.

واژگان کلیدی: پروانه دریایی، الگوریتم فراابتکاری، IGPSO، کاویتاسیون، بازده.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۰۵

۱- مقدمه

بهینه‌سازی مسائل واقعی مهندسی معمولاً خیلی چالش برانگیز است، به‌طوریکه بسیاری از مسائل و موضوعات از قبیل مسائل چندهدفه^۱، امکان‌پذیری، چندشرطی و عدم قطعیت وجود دارند که در حل آنان دخیل هستند. مانند چندهدفه بودن که به داشتن چندهدف برای یک مسئله اشاره دارد. عموماً در این مسائل تنها یک راه حل بهینه وجود ندارد. یک راه حل ممکن است در یکی از اهداف بهتر از سایر راه حل‌ها باشد، اما در سایرین خیلی نامناسب باشد. در این حالت مجموعه‌ای از راه حل‌ها که مجموعه راه‌حل‌های نسبتاً بهینه^۲ نامیده می‌شود، وجود دارد که به مسئله‌های با اهداف چندگانه پاسخ می‌دهد. مجموعه راه‌حل‌های نسبتاً بهینه شامل راه حل‌های تقریباً بهینه است که نشان می‌دهد بهترین موازنه ممکن بین اهداف به یک شکل خاص است [۱].

طراحی پروانه کشتی به علت وجود چندین هدف متضاد با هم، پارامترهای زیاد و موثر در طراحی و شرایط محیطی پیچیده جزو مسایل پیچیده مهندسی بحساب می‌آید. در گذشته انتخاب یا طراحی پروانه‌هایی با راندمان بهتر صرفاً با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی امکان پذیر بوده است. از آنجا که این روش‌ها قادر به تشریح مسائلی همچون کاویتاسیون و ارتعاشات نیستند، روش‌های تحلیلی مانند تئوری رانکین [۲] و اندرسون [۳] مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به خطاهای ایجاد شده در نتایج نهایی مربوط به محاسبات

دوبعدی، تئوری‌های سه بعدی سطوح و المان مرزی جهت رفع این خطا مورد استفاده قرار گرفت [۴]. با گسترش تئوری‌های مختلف، پارامترهایی مختلف موثر در طراحی پروانه ارائه گردیدند که طراحی براساس آنها صورت می‌گرفت و به همین نحو بهینه‌سازی‌ها نیز با تمرکز روی تاثیرات این پارامترها امکان پذیر می‌گردید [۵]. هدف‌های مهمی که در طراحی پروانه‌های دریایی موثرند عبارتند از: بیشترین تولید نیروی محوری، کمترین گشتاور، راندمان بهینه، هزینه، امکان ساخت و کمترین احتمال وقوع کاویتاسیون [۶]. در این روند با توجه به اینکه افزایش راندمان در بعضی از عوامل با هم در تضاد می‌باشد، باید مقادیر بهینه را محاسبه نمود.

مثلاً گام زیاد باعث افزایش راندمان (مطلوب) می‌شود، درحالیکه همین امر باعث افزایش کاویتاسیون (نامطلوب) می‌گردد. به این ترتیب چنانچه هرکدام از عوامل مورد نظر در محدوده مطلوب نباشد باید در پیش فرض‌های اولیه، مجدداً محاسبات را تا رسیدن به نتیجه بهینه ادامه داد. با توجه به محدودیت‌ها و پیچیدگی مساله طراحی پروانه از یک سو و توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری از سوی دیگر، بسیاری از محققان سعی در استفاده از این الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی پارامترهای مختلف نمودند [۷].

نویسندگان مرجع [۸] در این زمینه به ارائه الگوریتمی بهینه جهت طراحی پروانه شناورها با استفاده از سری واگنینگن^۳ پرداختند. الگوریتم دیگر که توانایی بالایی در مسائل پیچیده بهینه‌سازی دارد، الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این الگوریتم زمان کوتاهی در طراحی سامانه‌های پیش‌برنده صرف می‌کند [۹]. نویسندگان مرجع [۱۰-۱۲] از الگوریتم ژنتیک و بهینه شده‌های آن برای طراحی پروانه‌های دریایی استفاده کردند. مرجع [۱۳] بررسی جامعی در خصوص کاربرد الگوریتم‌های مختلف در طراحی پروانه تا سال ۲۰۱۶ انجام می‌دهد. با توجه به این بررسی میتوان نتیجه گرفت که الگوریتم‌های دارای ساختار تصادفی و روش‌های حل مسأله نامعین نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک نتایج بهتری را ارائه می‌کنند. الگوریتم ALO^۴ یکی دیگر از الگوریتم‌های فراابتکاری است که در سال‌های اخیر به‌منظور طراحی پروانه‌های دریایی استفاده شده است [۱۴].

به‌طور کل برای طراحی پروانه‌ها در مراجع مرور شده از دو روش کلی استفاده می‌شود. روش اول استفاده از روش‌های معین^۵ و روش دوم، روش‌های تصادفی^۶ می‌باشند. طراحی پروانه توسط الگوریتم‌های گروه اول، با توجه به وجود پارامترها و اهداف متنوع، بسیار پیچیده و زمان‌بر است. از سوی دیگر با توجه به نوع مساله و وجود پارامترهای بسیار زیاد طراحی و ابعاد بالای مساله، الگوریتم‌های تصادفی در بهینه‌های محلی گیر کرده و جواب بهینه کلی به دست نخواهد آمد [۱۵-۲۰].

از این‌رو در این مقاله ما از الگوریتم IGPSO^۷ برای بهینه‌سازی طراحی پروانه دریایی استفاده می‌کنیم. این

⁵ Deterministic

⁶ Stochastic

⁷ Independent Group Particle Swarm Optimization

¹ Multi-Objective

² Pareto Optimal Set

³ Wagningen Series

⁴ Ant-Lion Optimizer

نوع موربانه به نام‌های سرباز، کارگر، پرستار بچه و ملکه وجود دارند. آن‌ها از توانایی‌های متنوعی برخوردارند، اما این تفاوت‌ها برای بقای کلونیشان لازم است. این چهار نوع موربانه را می‌توان به عنوان چهار گروه مستقل در نظر گرفت که یک هدف مشترک گروهی دارند و آن بقای کلونی است [۲۲].

در PSO استاندارد تمام ذرات به‌طور مشابه در جستجوی محلی و عمومی رفتار می‌کنند. در این حالت، ذرات را می‌توان به عنوان یک گروه با یک راهبرد جستجو در نظر گرفت. با این حال به لحاظ نظری در هر الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، می‌توان با استفاده از گروه‌های مستقل متفاوت که هدفی مشترک دارند، نتیجه جستجوی تصادفی و مستقیم را به‌طور هم‌زمان به دست آورد. در این مقاله گروه‌های مستقل توسط روابط ارائه شده در [۲۳] برای به‌روزرسانی C_1 و C_2 استفاده شده است.

در این بخش چهار گروه مستقل که از کلونی موربانه‌ها الهام گرفته شده‌اند، تعریف می‌شوند. این چهار گروه مستقل از الگوهای خود برای جستجو در فضای مسئله به صورت محلی و عمومی استفاده می‌کنند. ضرایب پویای این الگوریتم‌ها در جدول (۱) و شکل (۱) معرفی شده‌اند. در این جدول، T نمایانگر حداکثر تعداد تکرارها است و t تکرار فعلی را نشان می‌دهد.

در IGPSO ابتدا همه ذرات به صورت تصادفی در فضای جستجوی مسئله قرار می‌گیرند. پس از آن، ذرات به‌طور تصادفی به برخی گروه‌های مستقل از پیش تعریف شده تقسیم می‌گردند. در هر تکرار، $gbest$ ، $pbest$ و تناسب ذرات تعریف می‌شوند. هر ذره با به‌کارگیری راهبرد گروهی خود، ضرایب C_1 و C_2 را به‌روزرسانی می‌کند. پس از محاسبه C_1 و C_2 سرعت و موقعیت ذرات با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) به‌روزرسانی می‌شوند.

۳- بحث و نتایج تجربی

در این بخش ابتدا توانایی الگوریتم IGPSO در یافتن کمینه محلی و سرعت همگرایی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. پس از اثبات توانایی IGPSO در کار با دادگان ابعاد بالا، الگوریتم ذکر شده برای کاربرد عملی طراحی پروانه دریایی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

الگوریتم با توجه به وجود گروه‌های مستقل (با توانایی جستجوی متفاوت فضای مساله) توانایی بسیار زیادی در اجتناب از بهینه محلی و در نتیجه رسیدن به جواب کلی را دارد. بدین منظور باید یک تابع شایستگی و عناصر جستجوی مساله تعریف گردند. همچنین پارامترهای موثر در طراحی نیز باید بررسی گردند و چند پارامتر مهم برای این موضوع انتخاب شود که در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد. سازمان‌دهی ادامه مقاله بدین صورت می‌باشد که در بخش ۲، الگوریتم IGPSO به طور کامل توضیح داده می‌شود. بخش ۳ به تعریف مساله بهینه‌سازی پارامترهای پروانه توسط این الگوریتم پرداخته می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی و بحث ارائه می‌شود و در نهایت نتیجه‌گیری ذکر می‌گردد.

۲- بهینه‌سازی

۲-۱- الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم PSO از رفتار اجتماعی پرندگان الهام گرفته شده است. این روش از تعدادی از ذرات (راه‌حل‌های نامزد) که در فضای جستجو به دنبال یافتن بهترین راه حل هستند، استفاده می‌کند. در همین حال همه ذرات به سوی بهترین ذره‌ای (بهترین راه حل) که در مسیرشان وجود دارد، حرکت می‌کنند. به عبارت دیگر، ذرات بهترین راه‌حل‌های خود را به عنوان بهترین راه حل کلی در نظر می‌گیرند. هر ذره در بهینه‌ساز ازدحام ذرات باید پارامترهایی مانند: موقعیت فعلی، سرعت فعلی، فاصله تا $pbest$ و فاصله تا $gbest$ را به منظور تغییر موقعیت خود در نظر بگیرد. مدل‌سازی ریاضی بهینه‌ساز ازدحام ذرات به صورت روابط (۱) و (۲) است.

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 \times rand \times (pbest_i - \chi_i^t) + c_2 \times rand \times (gbest - \chi_i^t) \quad (1)$$

$$\chi_i^{t+1} = \chi_i^t + V_i^{t+1} \quad (2)$$

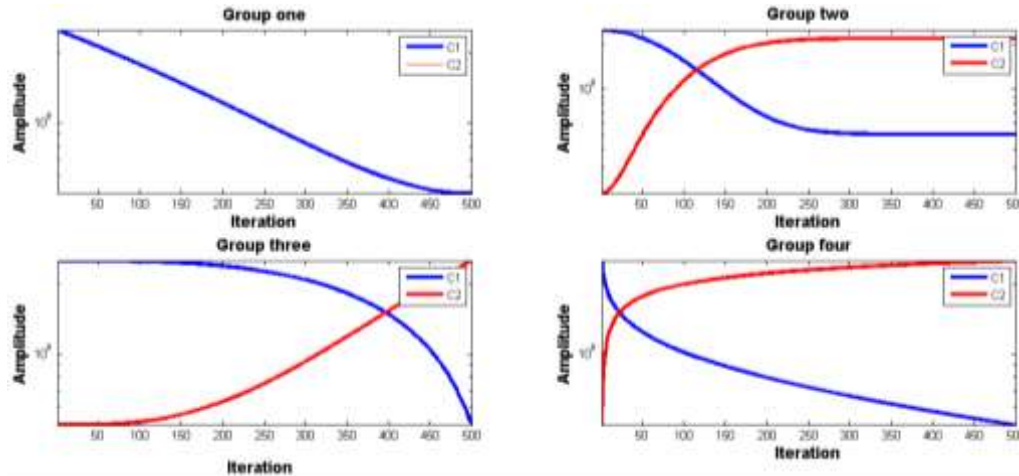
۲-۲- الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات با گروه‌های

مستقل (IGPSO)

در هر جمعیتی، افراد از لحاظ هوش و توانایی کاملاً مشابه نیستند، اما همه آن‌ها وظایفشان را به عنوان عضوی از گروه انجام می‌دهند [۲۱]. توانایی هر فرد می‌تواند در یک وضعیت خاص مفید باشد. به عنوان مثال، در یک کلونی موربانه، چهار

جدول (۱) به روز رسانی راهبردها.

گروه	C_1	C_2
گروه ۱	$2.5 - (2 \log(t) / \log(T))$	$(2 \log(t) / \log(T)) + 0.5$
گروه ۲	$(-2t^3 / T^3) + 2.5$	$(2t^3 / T) + 0.5$
گروه ۳	$0.5 + 2 \exp[-(4t/T)^2]$	$2.2 - 2 \exp[4t/T^2]$
گروه ۴	$2.5 + 2(t/T)^2 - 2(t/T)$	$0.5 - 2(t/T)^2 + 2(2t/T)$



شکل (۱) مدل های ریاضی از گروه های مستقل برای IGPSO.

جدول (۲) توابع معیار چند وضعی.

f_{min}	بازه	بعد	تابع
-418.9829×300	$[-500, 500]$	۳۰۰	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$
0	$[-5.12, 5.12]$	۳۰۰	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$
0	$[-32, 32]$	۳۰۰	$F_3(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$
0	$[-600, 600]$	۳۰۰	$F_4(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$
0	$[-50, 50]$	۳۰۰	$F_5(x) = \frac{\pi}{n} \{10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4}$ $u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m & x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(-x_i - a)^m & x_i < -a \end{cases}$
0	$[-50, 50]$	۳۰۰	$F_6(x) = 0.1 \{\sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)]\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$

۳-۱- آزمون توابع معیار

همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، ۶ تابع استاندارد با ابعاد بالا برای بررسی عملکرد IGPSO اعمال می شوند و هدف از آن ها یافتن کمینه عمومی است [۲۳-۲۶]. در این جدول dim بعد توابع v_h ، d محدوده فضای جستجو و f_{min} مقدار کمینه تابع است. توجه داشته باشید که

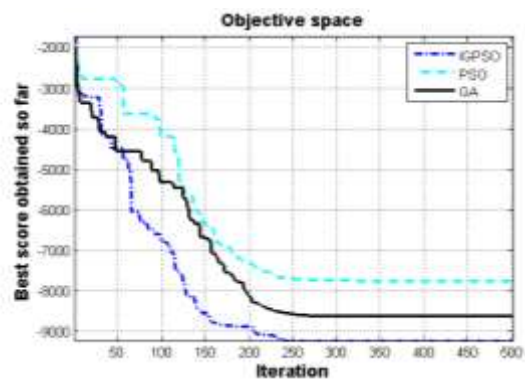
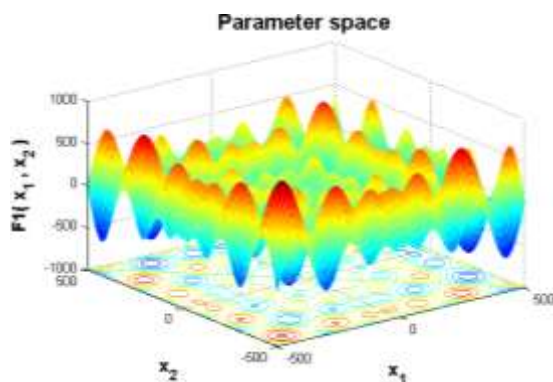
برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در مقابله با مسائل با ابعاد بالا، توابع چند وضعی با ۳۰۰ بعد انتخاب شده اند. به منظور تأیید اعتبار نتایج IGPSO، این الگوریتم با PSO و GA مقایسه می شود. ضرایب PSO و GA در جدول (۳) آمده اند. وزن اینرسی w برای الگوریتم IGPSO به طور خطی از ۰/۹ تا ۰/۴ کاهش می یابد. تعداد ذرات موجود ۱۰۰ عدد

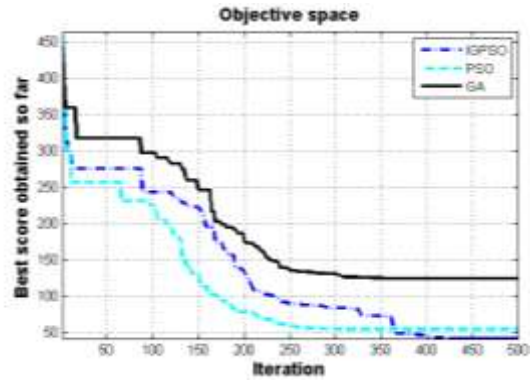
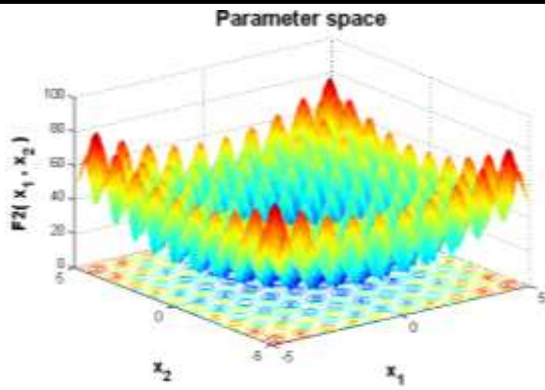
مستقل عملکرد الگوریتم PSO را از نظر اجتناب از کمینه‌های محلی افزایش داده‌اند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نرخ همگرایی الگوریتم IGPSO بهتر از الگوریتم‌های دیگر می‌باشد. دلیل بهبود توانایی IGPSO در اجتناب از کمینه محلی گروه‌های مستقل است. این عمل با جستجوی تصادفی بیشتر در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و GA حاصل شده است. در این حالت ذرات نمی‌توانند به آسانی در کمینه محلی به دام افتند.

و حداکثر تعداد تکرارها ۵۰۰ می‌باشد. نتایج برای توابع معیار چندوجهی در جدول (۴) و شکل (۲) ارائه می‌شوند. این توابع معیار از کمینه‌های محلی بسیار زیادی برخوردارند که با افزایش ابعاد مسئله به‌طور نمایی افزایش می‌یابند. بنابراین آن‌ها برای تعیین میزان قابلیت الگوریتم‌ها در اجتناب از کمینه محلی مناسب می‌باشند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در بسیاری از توابع معیار چندوجهی IGPSO بهتر از الگوریتم‌های دیگر عمل می‌کند. نتایج جدول (۴) و شکل (۲) نشان می‌دهد که گروه‌های

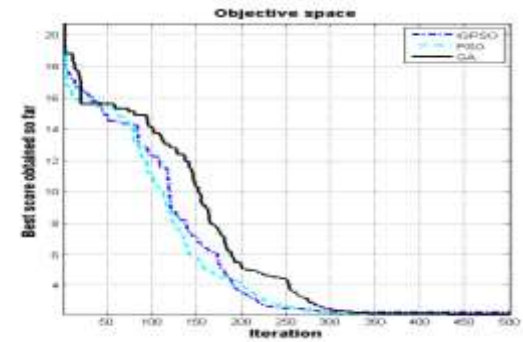
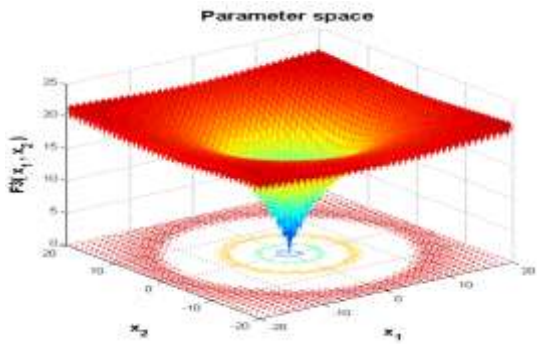
جدول (۳) پارامترهای اولیه الگوریتم‌ها.

مقدار	پارامتر	الگوریتم
۲۵۰	حداکثر تعداد تکرار	PSO & IGPSO
اتصال کامل	جانمایی	
۱	ثابت شناختی (C1)	
۱	ثابت اجتماعی (C2)	
۰,۳	ثابت محلی (W)	
۶۰	اندازه جمعیت	GA
کد شده واقعی	نوع	
چرخ رولت	انتخاب	
تک نقطه‌ای (۱)	ادغام	
یکنواخت (۰,۰۱)	چشم	
۱۰۰	اندازه جمعیت	
۲۵۰	حداکثر تعداد تکرار	

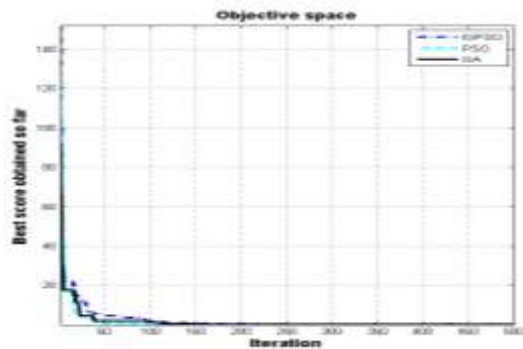
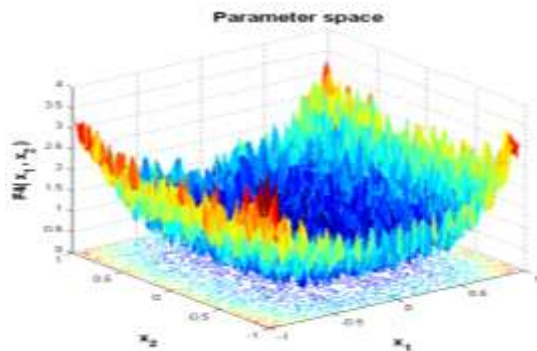
F₁



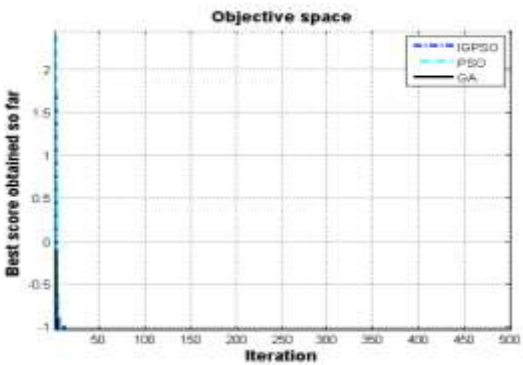
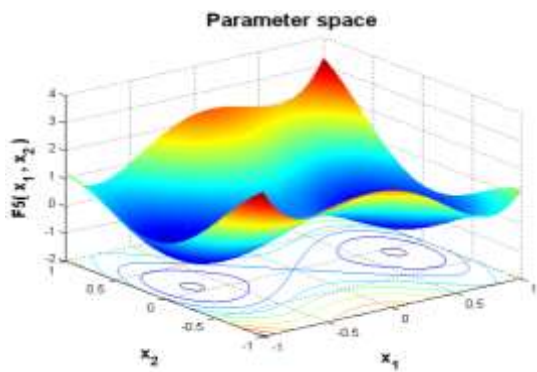
F₂



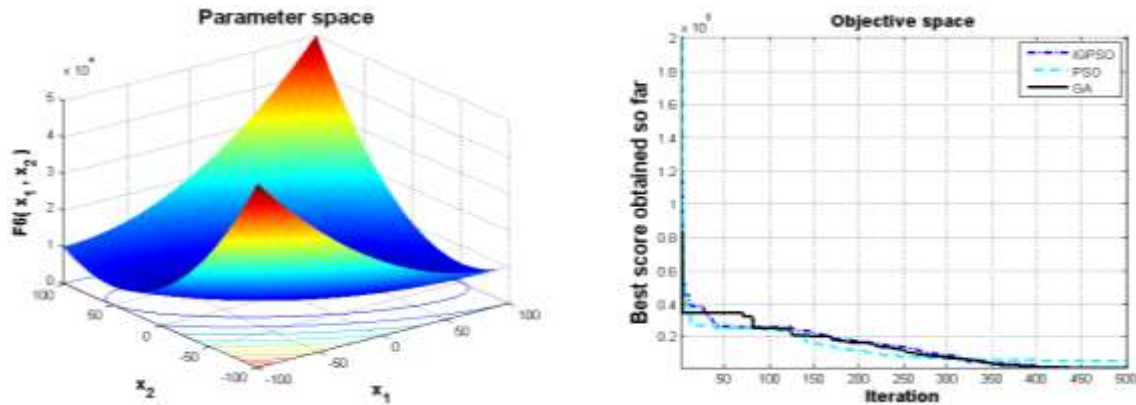
F₃



F₄



F₅



F₆

شکل (۲) مقایسه نمودار همگرایی الگوریتم IGPSO در توابع معیار چندوضعیتی.

۲-۳- طراحی پروانه

به علت غلظت نسبتاً بالای آب، بازدهی پروانه‌ها برای وسیله‌های دریایی در مقایسه با هواپیماها بسیار مهم است. بازده پروانه‌ها به توان موتور برمی‌گردد که به نیروی رانش تبدیل می‌شود. علاوه بر بازده، این تبدیل باید در حداقل مقدار از لرزش و سر و صدا انجام شود. ویژگی سوم از یک پروانه خوب خوردگی سطحی کم ناشی از کایتاسیون می‌باشد. یافتن تعادلی بین این سه حالت یک کار چالش برانگیز است که باید در طول فرآیند طراحی پروانه در نظر گرفته شود. قسمت عمده و اساسی پروانه، پره‌ها می‌باشند. شکل هندسی این پره‌ها باید نیازمندی‌های یادشده بالا را ارضا کند. پروانه سرعت ΔV را به سرعت ورودی V سیال اطراف خود اضافه می‌کند. این شتاب و تندی در دو قسمت ایجاد شده است: اول در نیمه جلویی پروانه و دوم در نیمه پشت پروانه. یک پروانه بوسیله‌ی چرخش خود، سیال اطراف خود را می‌چرخاند. مقدار این چرخش به سرعت چرخش موتور و تلفات انرژی بستگی دارد. اتلاف موثر پروانه‌ها به خاطر چرخش، ۱ تا ۵ درصد قدرت آن‌ها می‌باشد. نیروی رانش پروانه‌ها به شرح زیر محاسبه می‌شود [۳].

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \left(V + \frac{\Delta V}{2} \right) \rho \Delta V \quad (3)$$

که در اینجا، T برابر با نیروی رانش، D مبین قطر پروانه، V نشان دهنده سرعت جریان ورودی ΔV مبین سرعت اضافه شده است که توسط پروانه ایجاد می‌شود و ρ چگالی سیال می‌باشد. توان به عنوان نیرو درجایجایی بر واحد زمان تعریف می‌شود. قدرتی که نیاز است وسیله را با سرعت V برای استفاده از نیروی رانش در دسترس به حرکت درآورد به

صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$P_a = TV \quad (4)$$

یکی از اهداف بهینه‌سازی در پروانه‌ها تولید بیشترین نیروی رانش با کمترین مقدار توان ممکن می‌باشد. بازده پروانه‌ها به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{P_a}{P_{engine}} = \frac{T V}{P_{engine}} \quad (5)$$

همچنین بازدهی یک پروانه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta(x) = \frac{JK_{T(x)}}{2\pi K_{Q(x)}} = \frac{V_a K_{T(x)}}{2\pi n D K_{Q(x)}} \quad (6)$$

در اینجا، J مبین یک عدد پیشرفت، K_T نشان دهنده ضریب رانش پروانه و K_Q مبین ضریب گشتاور پروانه می‌باشد. در این رابطه، J به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۳].

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (7)$$

که در این رابطه، V_a مبین سرعت محوری، n نشان دهنده سرعت چرخش و D مبین قطر پروانه می‌باشد. با جایگزینی عبارت J بازدهی را می‌توان بصورت رابطه (۸) نوشت.

$$\eta(x) = \frac{V_a K_{T(x)}}{2\pi n D K_{Q(x)}} \quad (8)$$

در این رابطه، ضریب رانش K_T و ضریب گشتاور K_Q به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_{T_n} (J)^{s_n} \left(\frac{P}{D} \right)^{f_n} \left(\frac{A_e}{A_o} \right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (9)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_{Q_n} (J)^{s_n} \left(\frac{P}{D} \right)^{f_n} \left(\frac{A_e}{A_o} \right)^{u_n} (Z)^{v_n} \quad (10)$$

در این رابطه، P/D مبین نرخ گام، A_e/A_o نشان دهنده نرخ دیسک پروانه، Z تعداد پره‌ها و $V_n, u_n, t_n, S_n, C_{Qn}, V_n, C_{Tn}$

۳-۳- مراحل ساخت

در قسمت قبل تابع شایستگی مورد نیاز الگوریتم IGPSO به دست آمد. با توجه با پارامترهای معرفی شده برای این الگوریتم و در نظر گرفتن ۶۰ عامل جستجو سعی در بهینه کردن این تابع شایستگی نمودیم که نتایج در شکل (۵) و جداول (۴) و (۵) نمایش داده شده است.

جهت ساخت پروانه مورد نظر، مختصات وتر و ضخامت بهینه بدست آمده توسط الگوریتم IGPSO به عنوان بهترین پارامترهای ذکر شده برای طراحی پروانه ثبت شدند. سپس با توجه به پارامترهای به دست آمده در مرحله قبل، نقشه پروانه در نرم افزار Pro Cad ترسیم و جهت تبدیل فرمت به نرم افزار Catia وارد گردید.

در ادامه فایل مربوطه توسط نرم افزار Power mill (نرم افزار اجرایی دستگاه CNC) فراخوانی شد. دستگاه تراش سه محور پس از قرائت نقشه و تبدیل آن به کد با کمک نرم افزار Simco شروع به اجرای تراش از ماده بارگذاری شده (فسفر- برنز) نمود و در نهایت پروانه مورد نظر حاصل گردید. خلاصه‌ای از روند طراحی (از شروع تا رسیدن به محصول نهایی) در شکل (۴) نمایش داده شده است.

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

لازم به توضیح است که در طراحی مثال بالا به دلیل تعداد زیاد پارامترها و ایجاد پیچیدگی‌های ریاضی در رابطه ریاضی اصلی کلیه پارامترها مورد استفاده قرار گرفته نشده است و همه محدودیت‌ها اعمال نگردیده‌اند، زیرا حجم گسترده‌ای از محدودیت‌ها باعث ایجاد پیچیدگی‌های زیاد و در نتیجه اتلاف وقت زیاد می‌گردد. تقریب بهینه‌سازی این مسئله با ۲۵۰ تکرار انجام گردید و همانگونه که در شکل ۵ مشاهده شد، نتایج مطلوبی بدست آمده است.

این نتایج مربوط به دو نوع پروانه و با شرایط اولیه مشخص شده می‌باشد. بازه بهینه بدست آمده برای پروانه چهار پره ای در حدود ۰/۷۲۱۱ و برای پروانه پنج پره ای در حدود ۰/۶۸۹۵ است. با توجه به شکل ارائه شده کاملاً روشن است که این الگوریتم شکل بسیار صاف و موزونی را برای تیغه‌ها جهت دستیابی به راندمان بالاتر در هردو پروانه ارائه می‌کند.

ضرایب متناظر کاهنده هستند.

موضوع مهم دیگر در طراحی پروانه کاویتاسیون می‌باشد. هنگامی که پره‌های یک پروانه در داخل آب با سرعت بالا حرکت می‌کنند، نواحی کم فشار به شکل ذرات شتاب دهنده آب درآمده و از روی پره‌ها عبور می‌نمایند. این امر باعث شکل گیری حباب‌ها می‌شود که می‌ترکند و می‌توانند سبب ایجاد امواج متلاطم قوی محلی شوند. نتیجه این امر خوردگی در پروانه‌هاست. میزان حساسیت پروانه‌ها به کاویتاسیون به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{n,0.8} = \frac{(P_a + \rho gh_{0.8} - P_v)}{0.5\rho(\pi nD)^2} \quad (11)$$

که در اینجا، P_a مبین فشار اتمسفریک، P_v به فشار بخار آب اشاره دارد، g نشان دهنده شتاب گرانش و $h_{0.8}$ غوطه وری 0.8 از پره شعاعی (هنگامی که پره در موقعیت ساعت 12:00 قرار گرفته است) را نشان می‌دهد. هدف نهایی در این مقاله طراحی پروانه با بالاترین بازدهی و کمترین حساسیت کاویتاسیون است.

به عبارت دیگر برای پیدا کردن شکل هندسی نهایی پره‌ها، استاندارد $NACA^1$ انتخاب شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود دو پارامتر شکل ایرفویل^۲ را تعریف می‌کنند: الف) بیشترین ضخامت و ب) طول قوس. در این مقاله ده ایرفویل در طول پره بررسی می‌شوند. بنابراین تعداد کل پارامترها برای بهینه‌سازی ۲۰ عدد می‌باشد.

پارامتر نهایی برداری به شکل رابطه (۱۲) خواهد بود.

$$\vec{X}_i = (T_1, C_1, T_2, C_2, \dots, T_{10}, C_{10}) \quad (12)$$

که در این رابطه، T_i و C_i به ترتیب مبین ضخامت و طول قوس i امین ایرفویل در طول پره می‌باشند. در نهایت مسأله بهینه‌سازی طراحی پروانه دریایی می‌تواند به صورت رابطه (۱۳) بیان شود. در واقع این رابطه تابع شایستگی برای الگوریتم IGPSO خواهد بود.

$$\vec{X}_i = (T_i, C_i), \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (13)$$

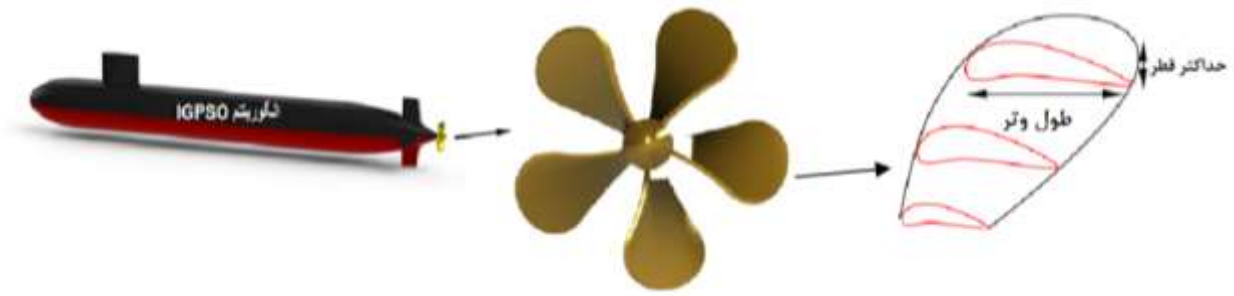
$$\text{maximise} : \eta(X)$$

$$\text{minimise} : V_c(X)$$

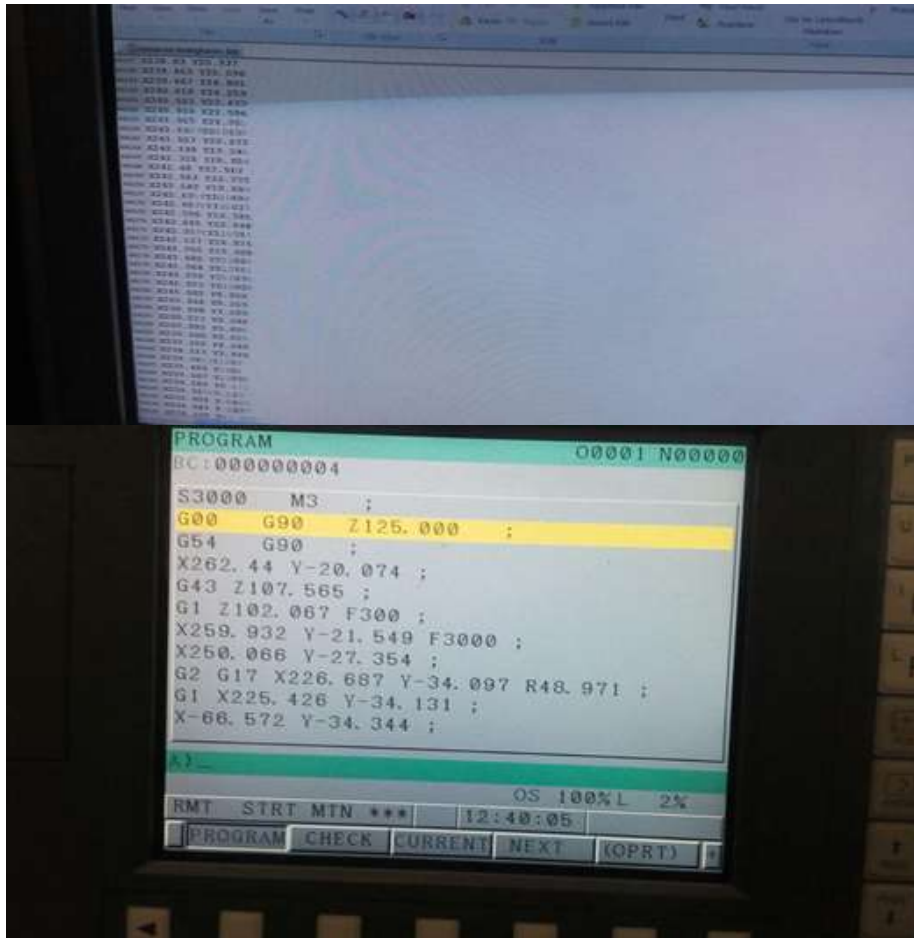
$$\text{رانس} \geq 10000$$

² Airfoil

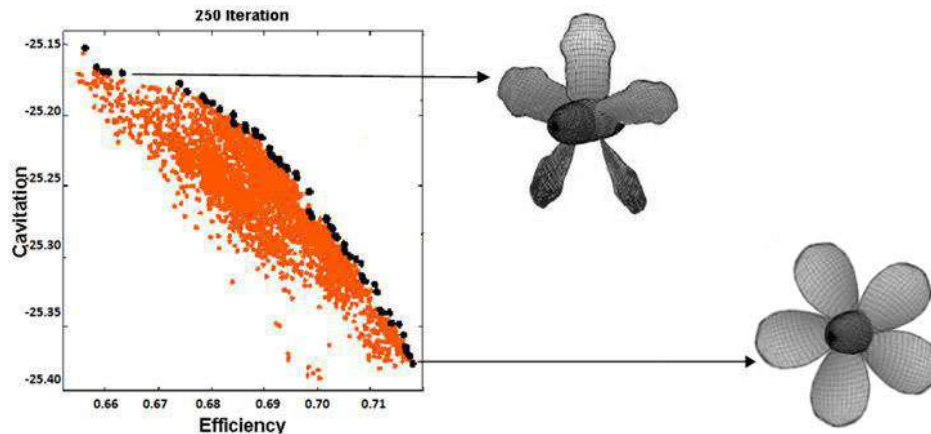
¹ National Advisory Committee for Aeronautics



شکل (۳) ایرفویل در طول پره که شکل پروانه را مشخص می کند.



شکل (۴) خلاصه‌ای از مراحل ساخت.



شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی الگوریتم IGPSO در بدست آوردن بهینه‌ترین نقطه برای بهترین بازده و کمترین کاویتاسیون.

جدول (۴) پارامترهای بدست آمده برای پروانه با ۵ پره.

ضخامت ۵	وتر ۵	ضخامت ۴	وتر ۴	ضخامت ۳	وتر ۳	ضخامت ۲	وتر ۲	ضخامت ۱	وتر ۱
۰/۰۰۱۱	۰/۱۱۶۰	۰/۱۶۸۰	۰/۲۰۴۸	۰/۲۲۵۱	۰/۲۱۷۰	۰/۱۸۵۰	۰/۱۶۸۰	۰/۱۴۲۱	۰/۱۳۲۱
ضخامت ۱۰	وتر ۱۰	ضخامت ۹	وتر ۹	ضخامت ۸	وتر ۸	ضخامت ۷	وتر ۷	ضخامت ۶	وتر ۶
۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۷۸	۰/۰۲۱۰	۰/۰۲۹۱	۰/۰۳۰۱

جدول (۵) پارامترهای بدست آمده برای پروانه با ۶ پره.

ضخامت ۵	وتر ۵	ضخامت ۴	وتر ۴	ضخامت ۳	وتر ۳	ضخامت ۲	وتر ۲	ضخامت ۱	وتر ۱
۰/۰۰۱۴	۰/۱۱۷۱	۰/۱۶۹۲	۰/۲۱۰۰۱	۰/۲۳۱۱	۰/۲۱۸۰	۰/۱۸۷۰	۰/۱۶۹۰	۰/۱۴۵۱	۰/۱۳۳۱
ضخامت ۱۰	وتر ۱۰	ضخامت ۹	وتر ۹	ضخامت ۸	وتر ۸	ضخامت ۷	وتر ۷	ضخامت ۶	وتر ۶
۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۸۲	۰/۰۲۱۹	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۱۰

ضرب گردند. شکل‌های (۸) و (۹) شدت نویز هیدروفن، FFT نویز در حالت واقعی و FFT نویز برحسب دسی‌بل را به ترتیب برای پروانه معیار و پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO نمایش می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، نویز تولیدی توسط پروانه طراحی شده (الگوریتم IGPSO) برابر با ۸۶/۶۴ dB است. این درحالی است که نویز تولیدی در شرایط کاملاً مشابه توسط پروانه معیار (طراحی سال ۲۰۱۵ مرجع [۲۷]) ۸۷/۸۸ dB می‌باشد که نشان دهنده بهبود عملکرد پروانه در حالت بدون کاویتاسیون است.

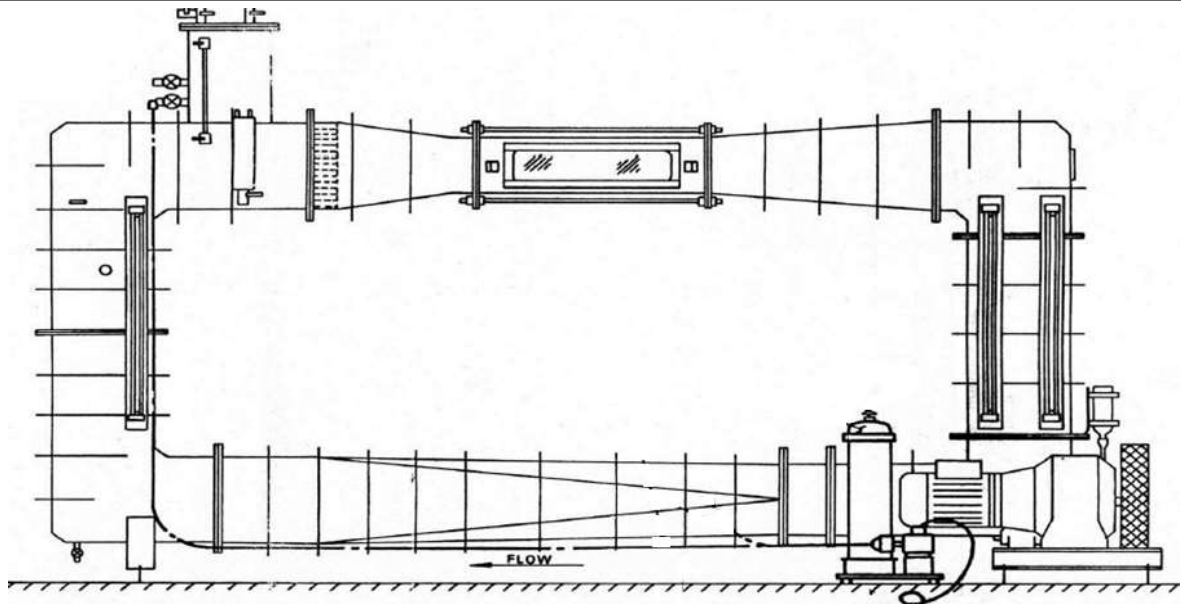
برای آزمودن عملکرد پروانه در مقابله با کاویتاسیون دور را تا ۱۸۰۰ RPM افزایش داده تا حباب‌های کاویتاسیون در تونل نمایان شود. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کاویتاسیون ایجاد شده، FFT کاویتاسیون در حالت واقعی و FFT کاویتاسیون برحسب دسی‌بل را به ترتیب برای پروانه معیار و پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO نمایش می‌دهند.

به منظور آزمودن میزان نویز آکوستیکی و کاویتاسیون تولید شده توسط پروانه طراحی شده در این مقاله، پروانه طراحی شده در تونل کاویتاسیون دانشکده مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) مورد آزمایش قرار گرفت. شمای این تونل تست کاویتاسیون در شکل (۶) نمایش داده شده است. همچنین سناریوی تست و تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری میزان نویز آکوستیکی و کاویتاسیون پروانه طراحی شده در شکل (۷) نمایش داده شده است.

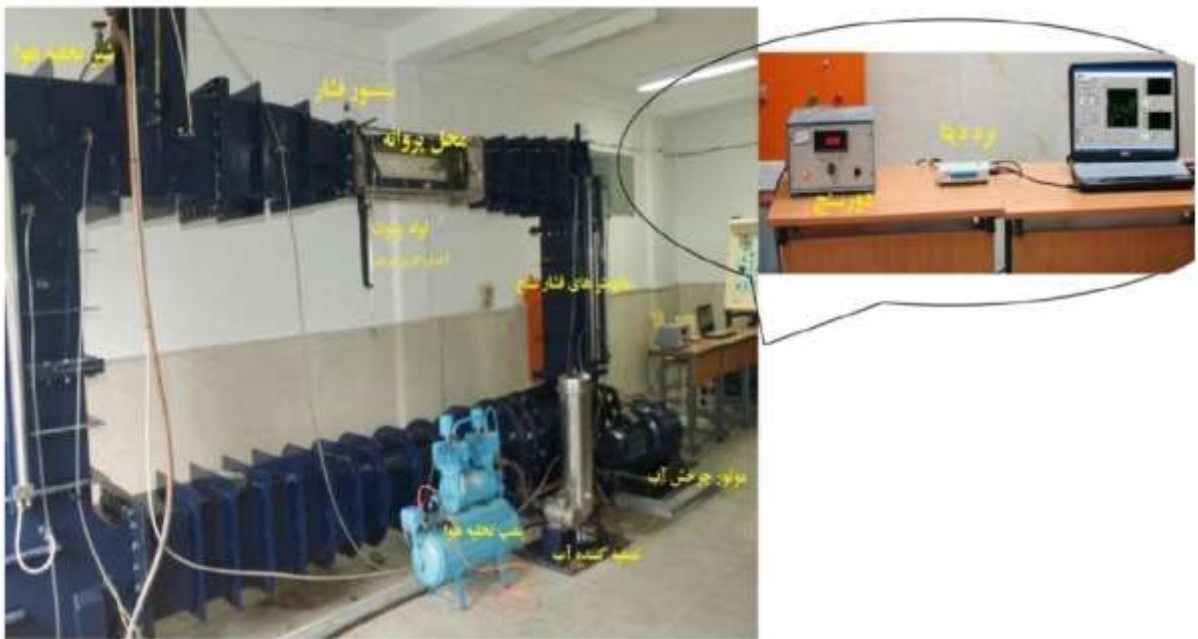
۳-۵- مقایسه سطح نویز آکوستیکی و کاویتاسیون

ایجاد شده توسط پروانه طراحی شده با پروانه معیار

با توجه به آزمایش‌ها و تست‌های استاندارد باید توان را برحسب دسی‌بل و به نسبت توان مرجع صوتی در آب که مقدار آن $1 \mu Pa$ می‌باشد، محاسبه نمود. از طرفی حساسیت هیدروفن بر حسب $\mu V/Pa$ بیان شده است که برای رسیدن به توان نسبی فشار خروجی هیدروفن، باید مقادیر آن در 10^6



شکل (۶) شمای کلی از تونل کاویتاسیون.

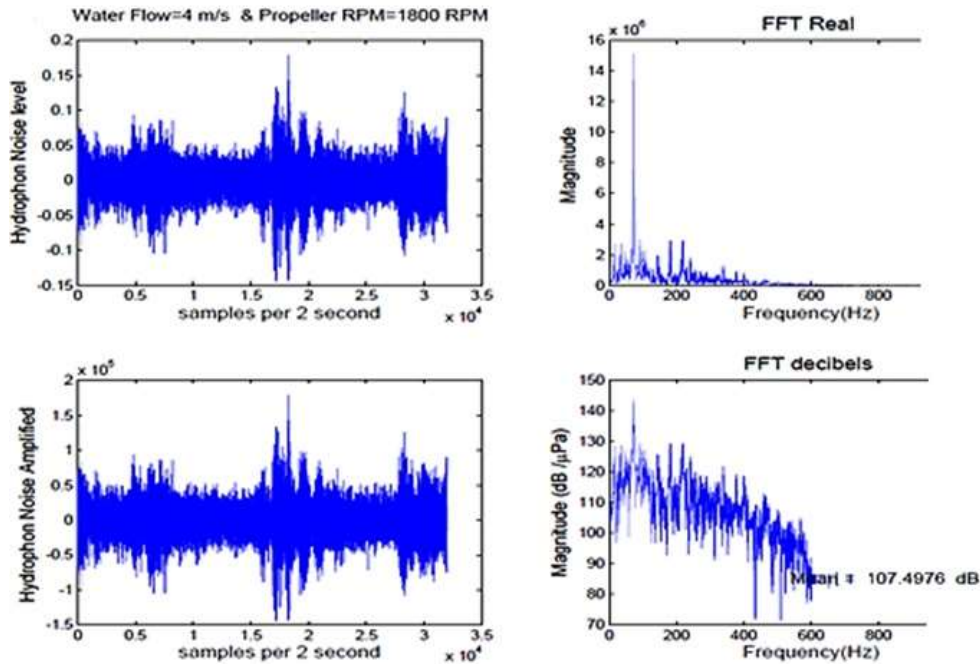


شکل (۷) نحوه‌ی قرار گرفتن تجهیزات و پروانه به منظور اندازه‌گیری نویز و کاویتاسیون ایجاد شده [۲۷].

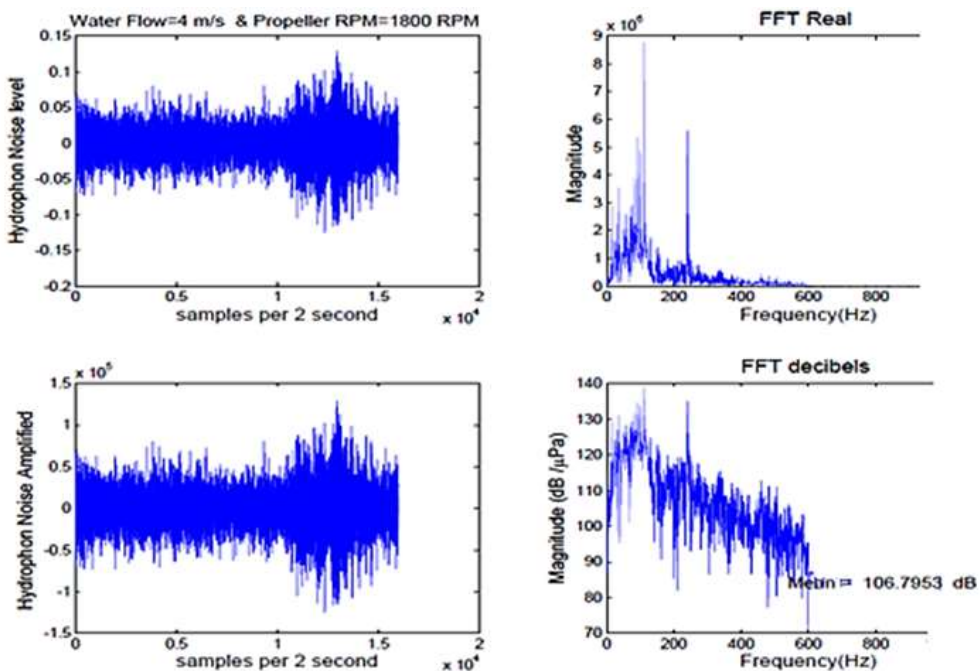
حالت کاویتاسیون به دلیل انفجار حباب‌های کاویتی از شدت و توان بیشتری برخوردار بوده و این امر در ترسیم نمودارهای نویز پروانه در دور ۱۸۰۰ RPM کاملاً مشهود است. با توجه به نمودار FFT نویز پروانه در دور ۱۸۰۰ RPM، می‌توان مشاهده کرد که نویز کاویتاسیون تولیدی توسط پروانه طراحی شده (الگوریتم IGPSO) برابر با ۱۰۶/۷۹ dB است.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نمودارهای کاویتاسیون و تبدیل فوریه را زمانی که آب در تونل با سرعت ۴ متر بر ثانیه جریان دارد و پروانه در دور ۱۸۰۰ RPM می‌کند را نشان می‌دهد.

نویز ناشی از ترکیدن حباب‌های کاویتی یک نوع نویز تک قطبی بوده که نحوه‌ی انتشار آن به صورت کروی است و در تمامی جهات به صورت یکسان انتشار می‌یابد. لذا نویز در



شکل (۱۰) سطح کاویتاسیون و تبدیل فوریه آن برای دور پروانه ۱۸۰۰ RPM، نرخ نمونه برداری ۸۰۰۰ سمپل بر ثانیه و جریان آب ۴m/s برای پروانه معیار طراحی شده در مرجع [۲۷].



شکل (۱۱) سطح کاویتاسیون و تبدیل فوریه آن برای دور پروانه ۱۸۰۰RPM، نرخ نمونه برداری ۸۰۰۰ سمپل بر ثانیه و جریان آب ۴m/s برای پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO.

آزمایش‌ها مشخص است سطح نویز کاویتاسیون تقریباً به میزان ۲۰ dB در شرایط یکسان از نویز حاصل از پروانه (بدون کاویتاسیون) بیشتر است که این خود نشان دهنده آن است که نویز کاویتاسیون نقش بسیار بیشتری در

این درحالی است که نویز تولیدی در شرایط کاملاً مشابه توسط پروانه معیار (طراحی سال ۲۰۱۵ مرجع [۲۷]) ۲۰/۴۹ می‌باشد که نشان دهنده بهبود عملکرد پروانه در حالت وجود کاویتاسیون است. همان‌گونه که از نتایج

- of Preliminary Design,” Springer Dordrecht, London, 2015.
- [5] Pouw, C. P. “Development of a Multi Objective Design Optimization procedure”, *Anziam Journal*, Vol.54, pp.345-360, 2013.
- [۶] حسن قاسمی، "بکارگیری روش المان مرزی و الگوریتم سینماتیکی برای طراحی پروانه کشتی"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی دریا*، شماره ۱، ص ۲۵-۳۸، تابستان ۱۳۸۳.
- [۷] حجت مختاری و حسین موسوی زادگان، "الگوریتم طراحی بهینه پروانه برای شناورها با استفاده از سری B-Wagingen"، *دوازدهمین همایش صنایع دریایی ایران (MIC 2010)*، مهرماه ۱۳۸۹.
- [8] Chen, J. H. and Shih, Y. Sh., “Basic Design of a Series Propeller with Vibration Consideration by Genetic Algorithm,” *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.12, No.3, pp.119-129, 2007.
- [9] Benini, E., “Multi-objective Design Optimization of B-Screw Series Propeller using Evolutionary Algorithms,” *Marine Technology*, Vol.40, No.4, pp.229-238, 2003.
- [10] Suen, J. B. and Kouh, J. S., “Genetic Algorithms for Optimal Series Propeller Design,” *Proceeding of the Third International Conference on Marine Technology*, Poland, pp.237-246, 1999.
- [۱۱] جواد رحمان نژاد، حسن قاسمی و عباس مرید حسنوند، "طراحی بهینه پروانه کشتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، *یازدهمین همایش صنایع دریایی ایران*، جزیره کیش، آبان ماه ۱۳۸۸.
- [۱۲] سجاد اردشیری، حسن قاسمی و محمود غیاثی، "طراحی بهینه پروانه کشتی همراه با ملاحظات ارتعاشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، *دوازدهمین همایش صنایع دریایی ایران (MIC 2010)*، زیبا کنار، مهرماه ۱۳۸۹.
- [13] Skaland, E. K., “The Influence of the Choice of Propeller Design Tool on Propeller Performance,” *Master Thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology*, 2016.
- [14] Mirjalili, S. A., “The Ant Lion Optimizer,” *Advances in Engineering Software*, Vol.83, pp.80-98, May 2015.
- [15] Mirjalili, S. A., Mirjalili, S. M. and Lewis, A., “Let a Biogeography-based Optimizer Train Your Multi-Layer Perceptron,” *Journal of Information Sciences*, Vol.269, pp.188-209, June 2014.
- [16] Abedifar, V., Eshghi, M., Mirjalili, S. and Mirjalili, S. M., “An Optimized Virtual Network Mapping using PSO in Cloud Computing,” *21st Iranian Conference on Electrical Engineering*, of Ashkarsazi and Shenasayi Shnorha Daro. Hman gone ke az ntaij shbihsazi w Azmash hay tjabri Mashade sho, پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO نسبت به پروانه معیار دارای بازده بیشتر و سطح نویز کایتاسیون کمتری است.
- #### ۴- نتیجه گیری
- در این مقاله برای طراحی پروانه‌های دریایی از الگوریتم فراابتکاری IGPSO استفاده شد. توانایی الگوریتم IGPSO در اکتشاف بهتر فضای جستجوی مسائل با ابعاد و پیچیدگی بالا می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده شد این الگوریتم با استفاده از ۴ گروه مستقل فضای مسأله را به‌طور کامل جستجو می‌کند و بدین ترتیب در مسائل پیچیده با بهینه‌های محلی زیاد، در بهینه محلی گیر نمی‌نماید. با استفاده از این الگوریتم توانستیم به پروانه‌ای با حداکثر بازده و حداقل کایتاسیون دست پیدا کنیم. این پروانه دارای ۴ یا ۵ پره می‌باشد. حداکثر بازده بدست آمده از این روش ۰/۷۲۱۱ است که بازده بسیار خوبی است. نتایج بدست آمده نشان داد که پروانه با ۵ یا ۶ پره که سرعت عملکرد بین ۱۸۰ تا ۱۹۰ RPM دارد، کمترین سطح نویز تولیدی را دارد. پروانه طراحی شده توسط الگوریتم IGPSO در حالت بدون کایتاسیون dB ۸۶/۶۴ و در حالت با کایتاسیون dB ۱۰۶/۷۹ نویز تولید می‌کند که نسبت به بهترین الگوریتم مورد مقایسه به ترتیب dB ۱/۲۴ و dB ۰/۸۰ نویز کمتری را به‌وجود می‌آورد. از آنجا که در این مقاله حالت‌های ساده مورد استفاده قرار گرفته است و از پیچیدگی معادلات و مسأله صرف نظر گردید، امکان تعمیم این الگوریتم و ارائه الگوریتمی که بتواند با در نظر گرفتن سایر پارامترهای طراحی پروانه، طراحی بهینه‌تری را انجام دهد، می‌تواند به عنوان کارهای پیش‌رو در نظر گرفته شود.
- #### ۵- مراجع
- [1] Brankes, J. Kaubler, T. and Schmeck, H., “Guidance in Evolutionary Multi-Objective Optimization”, *Advances in Engineering Software*, Vol.32, No.6, pp.499-507, 2001.
- [۲] رضا شمسی، "بررسی روش‌های طراحی پروانه‌های دریایی"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۲.
- [3] Carlton, J. S. “Marine Propeller & Propulsion,” *Butterworth-Heinemann*, 2012.
- [4] Papanikolaou, A., “Ship Design: Methodologies

- pp.1-6, 2013.
- [17] Nguyen, L. S., Frauendorfer, D., Mast, M. S. and Gatica-Perez, D., "Hire Me: Computational Inference of Hirability in Employment Interviews based on Nonverbal Behavior," IEEE Transactions on Multimedia, Vol.16, No.4, pp.1018-1031, 2014.
- [18] Barakat, M. Lefebvre, D., M. Khalil, F. Druaux and O. Mustapha, "Parameter Selection Algorithm with Self Adaptive Growing Neural Network Classifier for Diagnosis Issues," International Journal of Machine Learning, Vol.4, No.3, pp.217-233, 2013.
- [19] Guo, Z. X. Wong, W. K. and Li, M., "Sparsely Connected Neural Network-based Time Series Forecasting," Information Sciences, Vol.193, pp.54-71, 2012.
- [20] Csáji, B. C. "Approximation with Artificial Neural Networks," Faculty of Sciences, Etsv Lornd University, Hungary, 2001.
- [21] Mirjalili, S. Mirjalili, S. M. and Lewis, A., "Grey Wolf Optimizer," Advances in Engineering Software, Vol.69, pp.46-61, 2014.
- [22] Hedayatzadeh, R. , Salmassi, F. A., Keshtgari, M. and Akbari, R., "Termite Colony Optimization: A Novel Approach for Optimizing Continuous Problems," 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.553-558, 2010.
- [23] Mirjalili, S., Lewis, A. and Sadiq, A. S. "Autonomous Particles Groups for Particle Swarm Optimization," Arabian Journal for Science and Engineering, Vol.39, No.6, pp.4683-4697, 2014.
- [24] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. and Yang, X. S., "Binary Bat Algorithm," Neural Computing and Applications, Vol.25, No.3-4, pp.663-681, 2013.
- [25] Wang, G. G., Gandomi A. H. and Alavi, A. H., "A Chaotic Particle-swarm Krill Herd Algorithm for Global Numerical Optimization," Kybernetes, Vol.42, No.6, pp.962-978, 2013.
- [26] Wang, G. G., Gandomi, A. H. and Alavi, A. H. "An Effective Krill Herd Algorithm with Migration Operator in Biogeography-based Optimization," Applied Mathematical Modeling, Vol.38, No.9-10, pp.2454-2462, 2014.
- [۲۷] محمد کاظمی راد، داوود غرویانی و رحیم مالمیر، "تحلیل طیف فرکانسی نویز پروانه های مغروق در تونل کاویتاسیون،" دریافنون، دوره ۲، شماره ۲، ص ۱-۱۲، ۱۳۹۴.