

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.1.5.3](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1401.8.1.5.3)

درصد همانندی: ۱۳٪

بهینه‌سازی هندسی دامن انعطاف‌پذیر هواناو با استفاده از الگوریتم PSO

ایرج رجبی^{۱*}، رحیم میرکی باصری^۲، محمد حسین کریمی^۳

irajabi@mut.ac.ir

rahim.miraki.baseri@gmail.com

mhkarimi@mut-es.ac.ir

^{۱*}نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

^۳مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶

چکیده

در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای هندسی دامن هواناو با استفاده از الگوریتم PSO برای کاهش دامنه ارتعاشات وارده بر سازه و افزایش کیفیت سواری شناور بررسی شده است. در ابتدا معادلات دینامیک حاکم بر شناور در دو حالت تماس با سطح زمین و عدم تماس به صورت خلاصه ارائه شده است. بر اساس معادلات دینامیک غیرخطی ارائه شده، نقطه تعادل شناور استخراج شده و با خطی‌سازی معادلات دینامیک غیرخطی حاکم بر حرکت عمودی شناور حول نقطه تعادل، فرم خطی معادلات دینامیک حاکم استخراج شده است. برای کاهش ارتعاشات وارده و افزایش کیفیت سواری با شناور یک تابع هدف ارائه می‌شود و بر مبنای این تابع هدف و با استفاده از هر دو فرم معادلات دینامیک خطی و غیرخطی، پارامترهای هندسی دامن بر اساس الگوریتم هوشمند PSO به دست می‌آید. در نهایت نشان داده شده که در مقایسه رفتار فرکانسی و زمانی شناور بهینه‌شده با شناور اصلی، دامنه ارتعاشات کاهش و کیفیت سواری با شناور بهینه‌شده و به شدت بهبود یافته است.

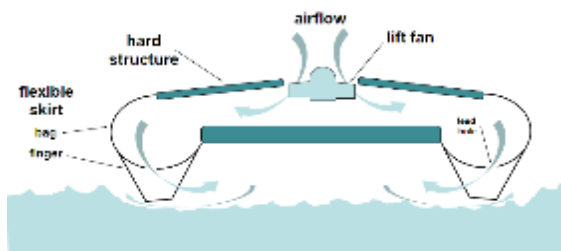
واژه‌های کلیدی: هواناو، دامن انعطاف‌پذیر، بهینه‌سازی، الگوریتم PSO

کم‌کم به یک بحران تبدیل شد. از مهم‌ترین اختراعات بشر در طول تاریخ چرخ بوده است، این مسئله انقلاب بزرگی را در زمینه حمل‌ونقل به وجود آورد به گونه‌ای که سرعت و توانایی حمل‌ونقل نسبت به دوره قبل از آن رشد شگفت‌انگیزی پیدا نمود؛ اما به دلیل ناهمواری‌های سطح زمین، پوشیده بودن بیش از هفتاد درصد از سطح زمین با آب، جنبه‌های اقتصادی حمل‌ونقل، پیشرفت و توسعه وسایل

۱. مقدمه

یکی از چالش‌هایی که بشر همواره از ابتدایی‌ترین تا جدیدترین مراحل توسعه با آن روبه‌رو بوده است، مسئله حمل‌ونقل بوده است. در ابتدا انسان با توجه به قدرت بدنی به این نیاز پاسخ می‌داد ولی با انجام تولیدات بیشتر این مسئله

سطوحی که دیگر شناورها قابلیت حرکت بر روی آن را ندارند، حرکت کند. در هواناها از دو نوع دامن واکنشی با قابلیت تغییر شکل هندسی و غیر واکنشی استفاده می‌شود. در شناورهای با دامن غیر واکنشی، تغییر شکل، جز در محل تماس دامن با سطح زمین وجود ندارد که این تغییر شکل بسیار کوچک است. این تغییر شکل از نوع کرنشی می‌باشد. این در حالی است که در دامن‌های واکنشی، تغییر شکل هندسی بسیار بالایی ایجاد می‌شود، به گونه‌ای که تغییر شکل حاصل از کرنش در مقابل آن‌ها قابل چشم‌پوشی است. تأمین فشار لازم و بلند نمودن سازه شناور از سطح دریا یا خشکی، عمل‌کننده به‌عنوان یک مستهلک کننده در برابر امواج، میسر شدن کنترل کامل هوانا به‌واسطه تقسیم‌بندی بالشتک هوا به‌وسیله دامن را می‌توان از مهم‌ترین وظایف دامن‌های واکنشی در شناور هوانا برشمرد.



شکل ۱. نمایش از توزیع جریان هوا به درون دامن انعطاف‌پذیر در یک هوانا

یک دامن ایده آل می‌بایست با تغییر شکل هندسی خود، در برابر تحریکات خارجی پاسخ دهد و فشار بالشتک هوا را کم یا زیاد نماید به گونه‌ای که شناور در مدت‌زمان بسیار کم به حالت تعادل خود هدایت شود. دو نوع مهم دامن‌های واکنشی، دامن کیسه باز و انگشتی، دامن کیسه بسته و انگشتی می‌باشد که در ادامه به تشریح هر کدام پرداخته می‌شود:

دامن کیسه باز و انگشتی درواقع کیسه‌ای است که از یک سو به انگشتی و از سوی دیگر به هوانا متصل است. در این نوع دامن با توجه به اتصال مستقیم، فشار کیسه و محفظه بالشتک کاملاً یکسان است و لذا نیروی بالابرنده بالایی

نقلیه چرخ‌دار نیز نتوانست نیازهای انسان را در زمینه مسئله حمل‌ونقل به‌طور کامل رفع کند. به همین منظور بشر در راستای عبور و حمل‌ونقل از طریق دریا، از حدود ۵۰۰۰ سال پیش به ساخت قایق‌ها و کشتی‌هایی اقدام نموده است. در ابتدا این شناورها از چوب به دلیل چگالی پایین آن نسبت به آب ساخته می‌شد و با استفاده از نیروی انسانی به جلو هدایت می‌شد؛ اما به دلیل سرعت پایین حمل‌ونقل با این شناورها، به تدریج با توسعه و پیشرفت علم، شناورهای بادبانی و در ادامه با توسعه پروانه‌های دریایی، کشتی‌های بخار و در نهایت دیزلی و هسته‌ای ساخته شدند اما به دلیل سرعت بالای حمل‌ونقل، مقاومت اصطکاکی و موج‌سازی این گونه شناورها افزایش یافت به گونه‌ای که موجب افزایش توان و در نتیجه هزینه سرسام‌آور شد. به‌منظور کاهش توان موردنیاز برای افزایش سرعت شناورها، ایده تزریق لایه هوا بین سطح شناور و آب بررسی شد که به شناورهای تندرو اثر سطحی و هواناها منجر شد.

هوانا را اولین بار، کریستوف ککرل در سال ۱۹۵۵ طراحی کرد. از زمان طراحی آن تاکنون، با توجه به کاربردهای چشمگیر و اهمیت زیاد آن، تحقیقات بسیار زیادی در زمینه طراحی این وسیله دریایی انجام گرفته شد. در دهه ۱۹۶۰، تحقیقات و مطالعات بسیار زیادی در زمینه درک دینامیک حرکت این وسیله دریایی انجام گرفته شد و بسیاری از کشورهای صنعتی هزینه‌های بسیار هنگفتی را در زمینه طراحی و ساخت این وسیله دریایی اختصاص دادند. یکی از مهم‌ترین اجزای شناور و درواقع جزئی که این شناور را از دیگر شناورهای دریایی متمایز می‌کند دامن انعطاف‌پذیر یا به بیان دیگر بالشتک هوانا است. در این نوع شناور فن‌های بالابرنده هوا را مکش و به دامن انعطاف‌پذیر و در نهایت به زیر شناور انتقال می‌دهد و باعث شناور ماندن هوانا بر روی قشر نازکی از هوا می‌شود (شکل ۱)؛ بنابراین شناور می‌تواند با توان نسبتاً کم و البته با سرعت بالا، بر روی

تولید می‌کند، هم‌چنین از آنجاکه انگشتی‌ها^۱، انعطاف‌پذیری زیادی دارند، نیروی پسای^۲ کمی تولید می‌کنند. از معایب آن عدم کنترل شناور به دلیل عدم امکان تقسیم‌بندی بالشتک می‌باشد. در نوع دامن کیسه بسته و انگشتی، برخلاف دامن کیسه باز و انگشتی، بین کیسه و محفظه بالشتک هوا افت فشار وجود دارد و لذا نیروی بالابری^۳ کمتری تولید می‌شود، ولی امکان تقسیم‌بندی و کنترل بالشتک هوا وجود دارد که ویژگی بااهمیتی است که تنها این نوع دامن داراست و بنابراین در هواناوهای زیادی استفاده می‌شود. هرچه عمق انگشتی در این گونه شناورها بالاتر باشد، انعطاف‌پذیری دامن بالاتر رفته و بنابراین قابلیت مانور شناور افزایش می‌یابد.

از جدیدترین و مهم‌ترین کارهای عملی صورت گرفته در زمینه بررسی رفتار دینامیکی هواناوها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

در سال ۱۹۹۳، هینچری و سالیوان [۱] پایداری هاورکرافت را بر روی آب بررسی کردند. در این پژوهش پایداری دینامیکی هواناو بدون در نظر گرفتن حرکت روبه‌جلو وسیله به‌صورت تحلیلی بررسی شد. ویژگی اصلی این پژوهش مدل‌سازی سطح آب زیر هواناو بود که بر روی دینامیک وسیله اثرگذار است.

چانگ^۴ [۲] در سال ۱۹۹۸ تئوری دینامیک خطی و غیرخطی حرکت دوبعدی هیو هواناو با استفاده از چندین مدل ریاضی را بررسی کرد. شبیه‌سازی‌های غیرخطی نشان داد که پدیده‌های دینامیکی غیرخطی، مانند دو برابر شدن دوره و آشفتگی جریان، می‌توانند طی حرکت هواناوها رخ دهند. اگرچه این نتایج نشان دادند که برخی از جنبه‌های دینامیکی بالشتک هوا و دامن می‌تواند غیرخطی باشد، اما نشان داد که در شرایط خاص، تکنیک‌های خطی‌سازی استاندارد می‌توانند پیش‌بینی‌های مفیدی را ارائه دهند. نتایج تجزیه و تحلیل خطی نشان داد که تغییرات در هندسه دامن

نمی‌تواند استفاده شود تا به‌طور اساسی پاسخ واکنش نامطلوب کیسه و انگشتی را تغییر دهد، اما برای کاهش وزن اسکرت بسیار مؤثر است.

در سال ۲۰۰۳ میلادی ساندرز^۵ در پایان‌نامه دکتری خود مدل‌سازی دینامیکی و کنترل یک نمونه از مدل تست هواناو را بررسی کرد. مدل‌سازی دینامیکی هواناو با استفاده از روش نیوتن-اولر انجام شد. مدل ۳ درجه آزادی پس از در نظر گرفتن فرضیه‌هایی فرمول‌نویسی شده است. در این مدل، گشتاور اینرسی در راستای محور عمودی به‌عنوان پارامتری ناشناخته محسوب می‌شود و یک آزمایش تجربی بر روی مدل تست برای به دست آوردن مقادیر مربوط به گشتاور اینرسی در بخش مهندسی مکانیک دانشگاه نیو ساوت ولز^۶ استرالیا انجام شده است. هرچند به‌طور کلی مقادیر به‌دست‌آمده از روش ریاضی نسبت به تست تجربی قابلیت اعتماد کم‌تری دارند، اما باوجود این مقادیر در فاصله خطای حدود ۱۰٪ از یکدیگر قرار دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که روش ریاضی در نظر گرفته‌شده برای مدل‌سازی حرکت ۳ درجه آزادی هواناو قابل اعتماد است [۳].

جون لو و هوانگ^۷ در سال ۲۰۰۹ میلادی معادله حرکت تغییر یافته ۴ درجه آزادی هواناو را پس از اندازه‌گیری تجربی نیروهای هیدرو دینامیکی یک هواناو با روش تست مکانیزم حرکت سطحی افقی ایجاد کردند، اما محدوده داده‌های آزمون محدود است. نیروهای آیرودینامیک، ملخ-ها و سیستم کنترل سکان هواناو با استفاده از تست‌های تجربی تونل باد به دست آمد. پایداری مسیر هواناو با استفاده از روش تعیین هورویتز با معادله دیفرانسیل انحراف تجزیه و تحلیل شد و سپس با استفاده از محاسبات، شبیه‌سازی پایداری مسیر چهار درجه آزادی هواناو بررسی شد. نتایج تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پایداری مسیر به‌صورت چهار درجه آزادی برای هواناو قابل اجرا است و بسیار منطقی‌تر و مناسب‌تر از حرکت دو درجه آزادی هواناو

است [۴].

در سال ۲۰۱۱، بخش مانور و کنترل مرکز جنگ ستارگان دریایی، همراه با فناوری‌های شبیه‌سازی کاربردی، برای ایجاد یک شبیه‌سازی کامل از دینامیک یک هواناو تمام تلاش خود را انجام دادند. این وسیله نقلیه با طراحی سرعت زیاد و مأموریت حمل و نقل مواد از کشتی‌ها به ساحل و سپس در سراسر ساحل است. این کار در ادامه فعالیت‌های هس و همکاران در سال ۲۰۰۶ و همچنین فالر و همکارانش در سال ۲۰۰۸ انجام پذیرفت. تمامی آن‌ها بر روی توسعه سیستم وابسته به زمان، برای بررسی حرکت هواناو کارهای خود را صورت دادند [۵]. نان جی^۸ در سال ۲۰۱۲ میلادی درباره شبیه‌سازی دینامیک هواناو در ساحل بررسی کرد. در ابتدا، در این پژوهش شکل موج پایین‌دست هواناو که با تغییر شکل سطح آب موج در آب‌های آرام و موج‌هایی در محیط خارجی ایجاد می‌شود، بررسی شد. در این پژوهش یک مدل ریاضی جامع‌تر از کنترل حرکت ۶ درجه آزادی برای هواناو ایجاد شده است که به صورت هم‌زمان ترم تریم دینامیکی حرکت هواناو از روی ساحل در این هواناو پیش‌بینی می‌شود. نتایج پیش‌بینی می‌تواند ویژگی‌های حرکتی اولیه هواناو را بهتر منعکس کند و نتایج شبیه‌سازی را می‌توان برای بررسی بیشتر مانور پذیری هواناو و بهینه‌سازی سیستم کنترل مانور هواناو استفاده نمود [۶].

سویان و السیف در سال ۲۰۱۳، مدلی غیرخطی را ارائه کردند که رفتار دینامیکی هواناو‌ها را مدل‌سازی می‌کند. این مدل تنها پاسخ عمودی وسیله را در دامنه‌های زمان و فرکانس در نظر می‌گیرد و برای بسط آن از معادلات تراکم‌پذیر برنولی، قانون دوم حرکت نیوتن و روابط آیزنروپیک غیرخطی استفاده شده است. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که نرخ جریان جرمی هوا درون بالشتک و طول دامن هواناو، دو عاملی هستند که بیشترین تأثیر را در کنترل رفتار حالت پایای نوسانات وسیله دارند. نویسندگان

معادله‌ای بدون بعد را بسط دادند که برای پیش‌بینی زمان نشست پاسخ استفاده می‌شود. با استفاده از این معادله، مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی هواناو به دست می‌آیند که به طراحان در طراحی وسیله‌ای با راندمان بالاتر کمک شایانی می‌کند [۷].

اوانیش^۹ در سال ۲۰۱۵، کنترل هواناو دارای ساختار بالشتک صلب را بررسی کرد. او به دنبال روشی برای توسعه چارچوب کنترل ساختار در عین کاهش خطای مطلق و نسبی مکانی در آن ساختار بود [۸]. در این ساختار یک مدل دینامیک غیرخطی برای هواناو با استفاده از اصول اولیه به دست می‌آید و ساختار آن برای طراحی یک کنترل‌کننده مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده شد.

دیوید^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۱۶ کنترل هواناو را با استفاده از شناسایی پارامترهای دینامیکی بررسی کردند. یک محاسبه‌گر پارامتر عمومی برای سیستم‌های ناپایای خطی در پارامترها در نظر گرفته شده است و سپس برای مدل دینامیک وسیله موردنظر مشخص می‌شود. در این تحقیق یک کنترل‌کننده ردیابی مسیری برای هواناو ارائه شده است که سیستم خطای ردیابی را به صورت نمایی پایدار می‌کند. نتایج تجربی، عملکرد و پایداری کنترل‌کننده و ارتباط آن با محاسبه‌گر را تأیید می‌کند [۹].

ساندرتو^{۱۱} در سال ۲۰۱۶ نرم‌افزاری مناسب بر اساس شبیه‌سازی رفتار دینامیکی برای یک هواناو طراحی کرد. درواقع، این روش اجازه می‌دهد تا برای هر پارامتر مدل دینامیکی مقادیر مشخصی در نظر بگیرد. پیدا کردن پارامترهای صحت سنجی الزامات، یک فیلتر بر اساس یک الگوریتم شاخه‌ای می‌باشد. این مطالعه درباره مسئله‌ای پیچیده از یک هواناو در شرایط دینامیکی مطرح شده است [۱۰].

شبیه‌سازی دینامیکی و تخمین پارامتری هواناوهای بدون

هرکدام از آن‌ها در میزان ناپایداری شناور و بهینه‌سازی هندسه بالشتک و تنظیم دیگر پارامترهای مؤثر است، به گونه‌ای که پایداری دینامیکی شناور در شرایط مختلف تضمین شود و علاوه بر آن پیک نوسانات شناور در شرایط بد، حداقل مقدار ممکن باشد. علاوه بر تضمین پایداری مسئله دیگر این است که فرکانس‌های مربوط به پیک حرکت عمودی شناور باید از بازه فرکانسی حساسیت انسان-ها دور نگه داشته شود.

۲. مدل‌سازی ریاضی

بررسی و استخراج معادلات حاکم بر هواناو، هنگامی که هواناو بر روی سطحی با طول‌موج کوچک‌تر از طول خود در حال حرکت است، به علت هندسه نامشخص آشفته‌گی‌های سطح زمین یا آب، پیچیده می‌باشد. لذا به‌ناچار، در ابتدا فرض می‌شود که شناور با سرعت ثابت بر روی سطحی با طول‌موج خیلی بزرگ‌تر از طول یا عرض وسیله در حال حرکت است. با توجه به این موضوع که شناور در طول مانور عملیاتی خود بیشتر بر روی چنین سطوحی حرکت می‌کند فرض معقولی است که باعث کاهش پیچیدگی معادلات دینامیک حاکم بر دامن و بالشتک هوا می‌شود که در این حالت آشفته‌گی‌های سطح به‌صورت صفحه تخت که حرکت عمودی معادل با حرکت شناور دارد، مدل می‌شود. هم‌چنین فرض می‌شود که برآیند حرکات شناور در صفحه عمودی، حرکت خالص عمودی می‌باشد، چرا که بنا به مطالعات انجام‌شده، در بین حرکات‌های مهم هواناو، مهم‌ترین حرکت که تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در طول عمر، آسایش مسافران و عملکرد وسیله خواهد داشت، حرکت عمودی است [۱۳]. با توجه به فرضیات صورت گرفته، استفاده از یک مقطع دوبعدی دامن، برای بررسی رفتار عمودی هواناو کافی می‌باشد. از آنجاکه به‌جز گوشه‌های دامن، انحناهای جانبی کوچکی در دامن صورت می‌گیرد،

سرنشین، موضوع تحقیق رشید^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۷) بود. این سیستم قادر است با یک سرعت ثابت یا در یک موقعیت ایستا، بر روی خشکی، آب یا سطوح دیگر مانور دهد. برای مدل‌سازی هواناوهای بدون سرنشین، سیستم باید دو پیشران داشته باشد که هوا را با فشار بالا به زیر وسیله وارد کنند و نیروی لازم برای لیفت را تأمین کنند. همچنین دو پیشران دیگر برای هدایت وسیله به سمت جلو استفاده می‌شوند. در این تحقیق برای مدل‌سازی ریاضی از روش لاگرانژی‌اولری استفاده شد و پارامترهای سیستم از محاسبه مستقیم و نرم‌افزار سالدورک به دست آمدند. نتایج نشان داد علی‌رغم ارتعاشات اولیه‌ای که در هنگام شروع به کار وسیله به وجود می‌آیند اما این ارتعاشات با گذشت زمان دچار میرایی می‌شوند و وسیله به‌طور پایا به حرکت خود ادامه خواهد داد [۱۱].

مانتل^{۱۳} (۲۰۱۷) طی یک پژوهش، روشی را بسط داد که بر پایه آن می‌توان نسبت نیروی برآ به پسا را برای یک هواناو حساب کرد و به‌طور خاص، مقدار ماکزیمم این نسبت و سرعت طراحی متناظر با آن را به دست آورد. دانستن چنین مقادیری به طراحان کمک می‌کند تا میزان کارایی درصد راندمان اقتصادی وسیله را برای هواناوهای آبی-خشکی و همچنین برای هواناوهای تنها-آبی به دست بیاورند. همچنین نتایج این تحقیق کمک می‌کند که با تحلیل پارامترهای هندسی وسیله و دامن انعطاف‌پذیر، یک تکنیک بهینه‌سازی حاصل شود. در محاسبه نیروی پسا، نویسنده دو عامل عمده را در نظر گرفت: اول پسای القاشده از طرف موج که با مجذور سرعت رابطه عکس دارد و دوم مجموع ترم‌هایی که نشان‌دهنده رابطه مستقیم نیروی پسا با مجذور سرعت هستند [۱۲].

مسئله‌ای که با توجه به مطالعات انجام‌شده هنوز بدون حل باقی مانده است، بررسی پارامترهای هندسی و دیگر پارامترهای مؤثر در پایداری دینامیکی بالشتک هواناو و تأثیر

حجم کلی دامن به بخش‌های حجم کیسه، انگشتی و بالشتک تقسیم‌بندی می‌شود که در این میان با توجه به نیروهای فشاری اعمال‌شده از طریق فشار سیال عامل، کیسه به سه بخش، کیسه بیرونی، میانی و داخلی تقسیم‌بندی می‌شود. قسمت کیسه بیرونی به صورت یک غشای غیرالاستیک که در معرض فشار یکنواخت کیسه P_b قرار دارند مدل می‌شود. قسمت داخلی کیسه نیز از دو لینک بدون وزن با طول‌های L_1 و L_2 تشکیل شده است. با در نظر گرفتن فشار یکنواخت، P_c در فضای V_c ، این لینک‌ها در معرض تفاضل فشار $P_b - P_c$ قرار دادند. در این مدل انگشتی به کیسه در نقطه C و به شناور در نقطه E، به وسیله دو لینک صلب L_1 و L_2 متصل شده است. با توجه به فرضیه‌های انجام‌شده، جرم شناور، متشکل از جرم دامن که در انگشتی متمرکز شده است و جرم هندسه صلب شناور که در مرکز جرم هندسه شناور متمرکز شده است و تنها المانی که حرکت دورانی دارد، دامن می‌باشد. با یافتن موقعیت هندسی جرم‌های متمرکز در نظر گرفته شده، مشتق‌گیری و در نهایت ساده‌سازی، میزان انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم به صورت زیر حاصل می‌شود [۱۴]:

(۱)

$$T = T_1 + T_2 = \frac{1}{2}(M_s + M_v)\dot{h}_c^2 + \frac{1}{2}\dot{\gamma}^2 \left(\frac{\Pi_s + L_M^2 M_s \sin^2(\Gamma_M + \gamma(t))}{L_M^2 M_s \cos^2(\Gamma_M + \gamma(t))} \right) + \frac{1}{2}\dot{\alpha}(t)\dot{\gamma}(t) \left(\frac{2L_1 L_M M_s \sin(\alpha(t)) \sin(\Gamma_M + \gamma(t))}{2L_1 L_M M_s \cos(\alpha(t)) \cos(\Gamma_M + \gamma(t))} \right) - L_1 M_s \cos(\alpha(t)) \dot{h}_c(t) \dot{\alpha}(t) - L_M M_s \cos(\Gamma_M + \gamma(t)) \dot{\gamma}(t) \dot{h}_c(t) + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2 (L_1^2 M_s \sin^2(\alpha(t)) + L_1^2 M_s \cos^2(\alpha(t))) \quad (2)$$

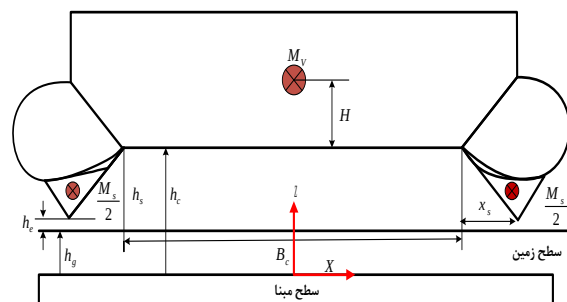
$$V = V_1 + V_2 = M_v g h_c(t) + M_s g (h_c(t) - L_M \sin(\gamma_M(t)) + L_1 (-\sin(\alpha(t))))$$

با تشکیل رابطه لاگرانژ $L = T - V$ و استفاده از اصل

همیلتونین، معادلات دینامیک حاکم بر هواناو به صورت ۳ معادله مرتبه دوم و غیرخطی زیر به دست می‌آید:

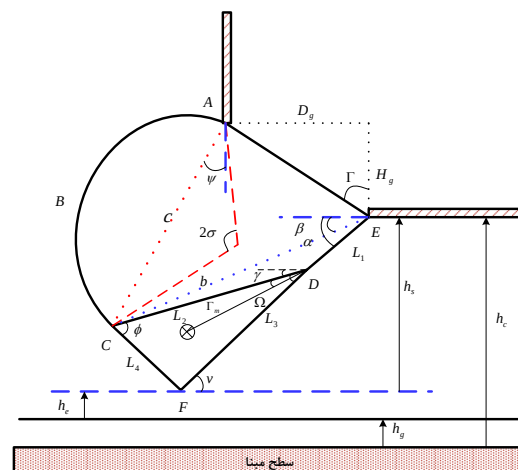
بنابراین فرض استفاده از مقطع دوبعدی برای بررسی حرکت عمودی هواناو، قابل توجیه می‌باشد.

شکل ۲، مقطع دوبعدی مورد مطالعه در این طرح را نشان می‌دهد. در این شکل، حرکت عمودی وسیله با h_c ، ارتفاع زمین از سطح مبنا با h_g ، فاصله بین نوک پایین انگشتی و سطح زمین (هاورگپ) با h_e و در نهایت h_s ارتفاع دامن نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از دامن انعطاف‌پذیر در یک هواناو

با توجه به پیوسته بودن مدل دامن انعطاف‌پذیر، به دست آوردن مدل دینامیکی برای دامن کاری پیچیده است. با توجه به شکل ۳، مدل‌های ریاضی (مدل صلب (صلب بودن دامن)، یک درجه آزادی (قابلیت تغییر β) و دو درجه آزادی (قابلیت تغییر α و γ)) بسیاری به منظور بررسی رفتار حرکت عمودی پیشنهاد داده شده است که عمدتاً با فرض متقارن بودن شناور و محدود نمودن شناور به حرکت در راستای قائم ارائه شده است.



شکل ۳. نمایی از دامن با در نظر گرفتن مدل دو درجه آزادی

بر اساس نوع فن مورد استفاده و در شرایط پایا، منحنی (۳)

مشخصه فن به صورت زیر قابل تقریب می‌باشد [۱۳]:

$$p_b = A_{f0} + A_{f1}Q_b + A_{f2}Q_b^2 + A_{f3}Q_b^3 \quad (۱۱)$$

بنابراین با در نظر گرفتن شرایط پایای فن استفاده شده، معادلات دینامیک شناور به صورت ۳ معادله مرتبه دوم (معادله‌های (۳)، (۴) و (۵)) و دو معادله مرتبه اول (۶) و (۷) قابل تقریب می‌باشد که به شدت غیرخطی است و استفاده از روش‌های معمولی عددی هم چون Runge-Kutta در مورد آن جواب نمی‌دهد. معادلات تعادل استاتیکی شناور نیز با صفر قرار دادن انرژی جنبشی و استفاده دوباره از رابطه لاگرانژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} -\frac{dV}{dq_i} + \tau_{q_i} = 0, i = \alpha, \gamma, h_c \\ \sin(\sigma) - \frac{c}{L_{ob}}\sigma = 0 \\ Q_b - Q_c = 0 \\ Q_c - Q_a = 0 \end{cases} \quad (۱۲)$$

از حل دسته معادله بالا بر اساس روش نیوتون رافسون، پارامترهای استاتیکی دامن $(\alpha_0, \gamma_0, h_{e0}, p_{b0}, p_{c0}, \sigma_0)$ مشخص می‌شود که در ادامه پایداری دینامیکی شناور حول این نقاط صورت می‌گیرد.

۳. اعتبارسنجی

در این بخش، با حل دسته معادلات غیرخطی (۱۲)، نقطه تعادل سیستم محاسبه می‌شود و با توجه به تئوری‌های ارائه شده در بخش‌های قبل، اعتبارسنجی اولیه از نتایج استاتیکی به دست آمده، صورت می‌گیرد، جدول ۱، مشخصات پارامترهای هواناوهای بررسی شده را نشان می‌دهد و در جدول ۲ نتایج به دست آمده از مطالعات چونگ و سیلیوان [۱۴]، در راستای تخمین پارامترهای تعادلی سیستم و حل عددی نسبتاً دقیق آن در این پژوهش با استفاده از معادلات ۱۲ مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از حل معادلات ۱۲ به مقادیر به دست آمده از چونگ و سیلیوان [۱۴]، بسیار نزدیک است و تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج ارائه شده در مطالعات چونگ و سیلیوان [۱۴] دارد.

$$(M_s + M_v)\ddot{h}_c(t) + gM_s + gM_v -$$

$$L_1M_s\ddot{\alpha}(t)\cos(\alpha(t)) +$$

$$L_1M_s\dot{\alpha}(t)\sin(\alpha(t)) -$$

$$L_MM_s\ddot{\gamma}(t)\cos(\Gamma_M + \gamma(t)) +$$

$$L_MM_s\dot{\gamma}(t)\sin(\Gamma_M + \gamma(t)) = \tau_{h_c}$$

(۴)

$$-L_1M_s\cos(\alpha(t))\ddot{h}_c(t) +$$

$$L_1M_s\left(L_M\dot{\gamma}(t)(-\sin(\Gamma_M - \alpha(t) + \gamma(t))) - g\cos(\alpha(t))\right) +$$

$$L_1^2M_s\ddot{\alpha}(t) + L_1L_MM_s\ddot{\gamma}(t)\cos(\Gamma_M - \alpha(t) + \gamma(t)) = \tau_{\alpha}$$

(۵)

$$-L_MM_s\ddot{h}_c(t)\cos(\Gamma_M + \gamma(t)) -$$

$$L_MM_s\left(g\cos(\Gamma_M + \gamma(t)) - L_1\dot{\alpha}(t)\sin(\Gamma_M - \alpha(t) + \gamma(t))\right) +$$

$$L_1L_MM_s\ddot{\alpha}(t)\cos(\Gamma_M - \alpha(t) + \gamma(t)) +$$

$$\ddot{\gamma}(t)(I_s + L_M^2M_s)$$

$$= \tau_{\gamma}$$

با بهره‌گیری از اصل بقای جرم و در نظر گرفتن هوای

محصور در فضای بالشتک به صورت پلی تروپیک، میزان تغییرات فشار هوای درون دامن در دو محفظه کیسه و بالشتک بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\dot{p}_b = \frac{1}{C_b}\left[Q_b - Q_c - \frac{\partial V_b}{\partial \alpha}\dot{\alpha} - \frac{\partial V_b}{\partial \gamma}\dot{\gamma}\right] \quad (۶)$$

(۷)

$$\dot{p}_c = \frac{1}{C_c}\left[Q_c - Q_a - \frac{\partial V_c}{\partial \alpha}\dot{\alpha} - \frac{\partial V_c}{\partial \gamma}\dot{\gamma} - \frac{\partial V_c}{\partial h_e}\left(\dot{h}_c - \dot{h}_g - \frac{\partial h_s}{\partial \alpha}\dot{\alpha} - \frac{\partial h_s}{\partial \gamma}\dot{\gamma}\right)\right]$$

فوق:

$$Q_c = A_b \operatorname{sgn}(p_b - p_c) \sqrt{\frac{2|p_b - p_c|}{\rho}} \quad (۸)$$

$$Q_a = L_p h_f(h_e, \theta) \operatorname{sgn}(p_c) \sqrt{\frac{2|p_c|}{\rho}} \quad (۹)$$

$$h_s = L_1 \sin \alpha + L_3 \sin(\Omega + \gamma) \quad (۱۰)$$

جدول ۱. پارامترهای مربوط به هوانا‌های بررسی شده در شبیه‌سازی

مشخصات فن				مشخصات هندسی دامن						مشخصات کلی			مدل
ξ	Q_{br} (m^3/s)	P_{br} (Pa)	A_b (m^2)	Ω (rad)	L_{ob} (m)	L_4 (m)	L_3 (m)	L_2 (m)	L_1 (m)	M_c (m)	L_b (m)	B_b (m)	
۱،۲	۹۵،۷۸	۲۴۷۰	۳،۶۹۵	۰،۵۷۶	۲،۶	۱،۱	۱،۶۹	۲،۰۲	۰،۱۸	۳۶۷۴۱	۱۸،۲۴	۵،۷۵	۳۷ تن (۱)
۱،۴	۳۸۲	۵۶۰۰	۹،۲۸۹	۰،۶۹۵	۳،۹	۱،۶۵	۲،۵۴	۳،۰۳	۰،۲۷	۱۵۷۰۰۰	۲۲،۸۶	۷،۴۷	۱۵۷ تن (۱)

جدول ۲. نتایج به دست آمده از نقطه تعادل هوانا

شرایط تعادل دامن					شرایط تعادل فشار				مدل
h_{e0} (m)	h_{f0} (m)	h_{t0} (m)	γ_0 (rad)	α_0 (rad)	h_{e0} (mm)	p_{b0}/p_{e0}	Q_{e0} (m^3/s)	P_{e0} (Pa)	
۱،۲۵۴	۰،۰۲۸	۱،۲۵۸	۰،۱۸۹	۰،۵۰۱	۴	۱،۲	۹۶،۸	۲۰۱۶،۵	۳۷ تن (۱)
۱،۲۲۸۶	۰،۰۲۴۵	۱،۲۳۲۵	۰،۱۷۰۶	۰،۴۶۷	۴	۱،۱۵۳۶	۸۹،۰۰۴	۲۳۱۰،۴	مطالعه حاضر
۱،۷۰۲	۰،۰۵۴	۱،۷۱۲	۰،۱۰۳	۰،۴۲۴	۱۰	۱،۲	۳۷۴،۵	۴۷۳۳،۷	شناور ۱۵۷ تنی (۱)
۱،۷۰۵۵	۰،۰۴۳۵	۱،۷۱۶	۰،۱۰۹۷	۰،۳۶۹۵	۱۰،۵	۱،۱۳۵	۳۲۸،۰۳	۵۶۵۸،۹	مطالعه حاضر

می‌کند تا دیگر اعضا را به سمت هدف موردنظر هدایت کند. این پدیده را می‌توان در حرکت دسته‌جمعی برخی انواع پرندگان مهاجر مشاهده کرد. در هر یک از تکرارهای الگوریتم PSO، بهترین پاسخ پیداشده تا آن تکرار ($Gbest$)، به عنوان رهبر گروه انتخاب می‌شود. همچنین، حافظه هر عضو ($Pbest$) نیز که بیان‌کننده بهترین پاسخ یافته شده توسط آن عضو می‌باشد، به هنگام سازی می‌شود. سپس سرعت حرکت هر عضو با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۱۳)

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + rand \cdot C_1 \cdot (Gbest^k - X_i^k) + rand \cdot C_2 \cdot (Pbest_i^k - X_i^k)$$

$$i = 1, \dots, np$$

در این رابطه، V_i^k و X_i^k به ترتیب موقعیت و سرعت ذره i ام در تکرار قبل (k) هستند. C_1 و C_2 پارامترهای خاص الگوریتم PSO هستند که به ترتیب میزان وابستگی سرعت هر ذره را به بهترین پاسخ پیداشده (حافظه گروه)، حافظه خود عضو و سرعت پیشین آن، نشان می‌دهند. به منظور دادن

۴. بهینه‌سازی دامن با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات

۴-۱. مروری بر الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات یا PSO از جمله شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که از رفتار گروهی و حرکت دسته‌ای و یکپارچه برخی از انواع جانداران نظیر پرندگان و ماهی‌ها (به‌ویژه به منظور یافتن غذا) الهام گرفته شده است. حرکت دسته‌جمعی مزایای زیادی را برای این جانوران فراهم می‌آورد که از آن جمله می‌توان یافتن آسان‌تر و سریع‌تر غذا و محافظت و ایمنی بیشتر در هنگام حمله حیوانات شکارچی را نام برد. در این نوع زندگی، موقعیت هر یک از جانداران در هر لحظه تابعی از موقعیت دیگر اعضای اطراف آن و موقعیت کلی دسته می‌باشد که به حرکتی بهینه و مطلوب برای تمام اعضا در راستای هدف کلی گروه منجر می‌شود. در الگوریتم PSO، حرکت هر یک از اعضا دسته بر پایه اطلاعات ذخیره‌شده در حافظه آن عضو و نیز حرکت کلی گروه صورت می‌گیرد. در حرکت دسته‌جمعی، هر دسته یک رهبر دارد که سعی

ماهیت تصادفی به جستجوی فضا، در این معادله از پارامتر $rand$ استفاده شده است که یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک تولید می‌کند. همان‌طور که در این معادله دیده می‌شود سرعت ذره از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول که تأثیر وزن و اینرسی ذره را نشان می‌دهد، بیان می‌دارد که سرعت ذرات مطابق آنچه در طبیعت و قوانین فیزیکی برقرار است، نمی‌تواند به‌طور ناگهانی تغییر کرده یا صفر شود؛ بلکه تابعی است از سرعت ذره در لحظه قبل از آن. جملات دوم و سوم تابع محاسبه سرعت، به ترتیب بردارهای حرکت ذره را در جهات بهترین پاسخ گروه و حافظه خود ذره (بهترین پاسخ یافته شده توسط آن عضو)، نشان می‌دهند. پس از محاسبه سرعت، موقعیت جدید ذرات از رابطه زیر، به دست می‌آید:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad i = 1, \dots, np \quad (14)$$

با توجه به روابط بالا ملاحظه می‌شود که در الگوریتم PSO حرکت ذرات و به‌هنگام‌سازی موقعیت آن‌ها در هر مرحله، با نگاهی کلی به بهترین موقعیت پیدا شده و حافظه هر یک از اعضا به‌صورت هم‌زمان، صورت می‌گیرد. به بیانی دیگر هر عضو با نگاهی به موقعیت رهبر گروه که دانش و اطلاعاتی بیش از دیگر اعضا دارد و نیز اطلاعات به‌دست‌آمده توسط خود آن عضو که بیانگر تجربیات آن عضو می‌باشد، جهت حرکت خود را تعیین کرده و در آن جهت حرکت می‌کند. میزان بهایی که اعضای جمعیت به هر یک از این عوامل می‌دهند را با ضرایب C_1 و C_2 نشان می‌دهیم. شبیه‌سازی‌های متعدد انجام شده با استفاده از الگوریتم PSO نشان داده است که برای رسیدن به پاسخ‌های مطلوب، انتخاب این دو ضریب بایستی در محدوده‌های زیر صورت گیرد:

$$C_1 + C_2 \leq 4 \quad \& \quad C_1 > 0 \quad \& \quad C_2 > 0$$

همچنین مقدار بهینه ضریب w ، در محدوده $0.4 \leq w \leq 0.9$ به دست آمده است.

در حالت کلی مقادیر بهینه این ضرایب برای مسائل گوناگون متفاوت است و برای هر تابع هدف خاص، بایستی به‌صورت جداگانه و با آزمون و خطا، محاسبه شود. با این حال، تاکنون روش‌های متعددی برای انتخاب مقادیر مناسب این ضرایب به‌صورت خود به روز شونده ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به انتخاب ضریب w به‌صورت فازی اشاره کرد که در این مقاله برای دستیابی به پاسخ‌هایی بهتر و در زمان کمتر، استفاده می‌شود. پس از به دست آوردن موقعیت جدید تمام اعضای جمعیت، تابع هدف آن‌ها محاسبه می‌شود. در صورتی که موقعیت جدید به‌دست‌آمده برای یک عضو، تابع هدف بهتری را نسبت به تجارب پیشین آن عضو فراهم آورد، این موقعیت جدید در حافظه آن عضو جایگزین بهترین موقعیت پیشین یافته شده توسط آن می‌شود. پس از به‌روزرسانی حافظه تمام اعضای جمعیت، عضو دارای بهترین موقعیت (از لحاظ تابع هدف)، به‌عنوان رهبر گروه در تکرار بعدی الگوریتم انتخاب می‌شود. در این مرحله و پیش از رفتن به تکرار بعدی در روند بهینه‌سازی، شرط همگرایی مسئله بررسی می‌شود و در صورت ارضای آن شرط روند تکراری الگوریتم پایان یافته و آخرین رهبر گروه به‌عنوان پاسخ نهایی مسئله بهینه‌سازی معرفی می‌شود.

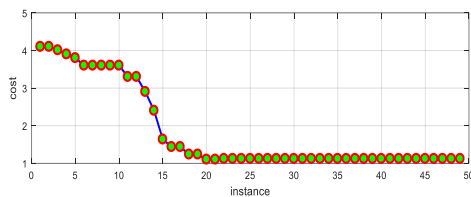
۵-۲. تعریف تابع هزینه

پارامترهای هندسی دامن تأثیر بسزایی در پیک نوسانات شناور هواناو ضمن حرکت روی سطح زمین دارد. مواردی که بر مبنای آن می‌بایست تابع هزینه شناور تنظیم شود مشتمل بر موارد زیر است.

الف- پیک دامنه نوسانات

دو پیک در تحلیل فرکانسی شناور هواناو دیده می‌شد، پیک اول و متناظر با فرکانس پایین‌تر مربوط به جرم شناور و پیک دوم مربوط به جرم دامن می‌باشد. اهدافی که در بهینه‌سازی می‌بایست دنبال شود، این موضوع است که پارامترهای دامن هواناو به‌گونه‌ای تنظیم شوند که میزان هر

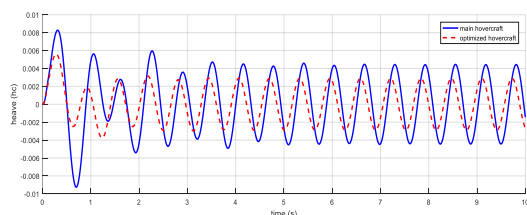
بین تحلیل دینامیکی شناور بهینه شده و شناور ۳۷ تنی در شکل های ۱۲ تا ۱۶، نشان داده شده است، در یک اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه، دامنه نوسانات شناور بهینه شده خیلی کمتر از شناور ۳۷ تنی است. برای تحلیل دقیق تر و مقایسه بین رفتار شناور بهینه شده و شناور ۳۷ تنی، شکل ۱۷، به مقایسه تحلیل فرکانسی بین شناور بهینه شده و شناور اصلی می پردازد، همان طور که از این شکل قابل استنتاج است، اگرچه بهینه سازی بر مبنای دو پیک تحلیل فرکانسی و فرکانس متناظر با آن صورت گرفته ولی به جز در محدوده فرکانسی خیلی پایین، دامنه نوسانات شناور بهینه شده خیلی کمتر از شناور ۳۷ تنی می باشد.



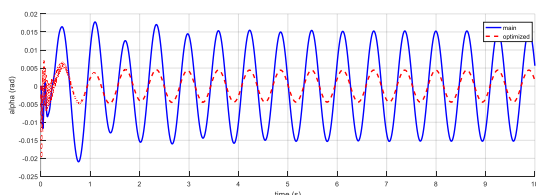
شکل ۴. فرایند همگرایی به جواب

جدول ۳. پارامترهای بهینه شده بر مبنای مدل خطی

L _۱	L _۲	L _۳	L _۴	L _{ob}	Cost
۰.۰۱	۲.۵۲	۲.۴	۰.۹۶۴	۳.۳	۱.۱۱۸



شکل ۵. مقایسه حرکت عمودی شناور ۳۷ تنی و بهینه شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



شکل ۶. مقایسه درجه آزادی α شناور ۳۷ تنی و بهینه شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه

دو پیک موجود در تحلیل فرکانسی کاهش یابد.

ب-فرکانس متناظر با پیک

ارتعاشات با فرکانس تقریباً ۲۰ تا ۲۵ هرتز، فرکانسی است که انسان ها نسبت به آنها حساس ترند، بنابراین قید دیگری که باید بر مبنای آن تابع هزینه تنظیم شود، این است که فرکانس متناظر با پیک تحلیل فرکانسی از بازه فرکانس ۲۰ تا ۲۵ هرتز دور شود.

با توجه به موارد بالا، ما با یک مسئله بهینه سازی چند هدفه سروکار داریم که هم زمان می بایست سه موضوع کمینه شود: پیک های اول و دوم تحلیل فرکانسی و دور شدن فاصله فرکانس متناظر با پیک تحلیل فرکانسی از بازه فرکانسی حساسیت انسان، بر همین مبنای تابع هزینه به صورت زیر تعریف شده است:

(۱۵)

$$\text{cost} = w_1 A_1 + w_2 A_2 - w_3 |\omega_{\max} - 22.5|$$

که در رابطه بالا $A_i, i = 1, 2$ ، پیک های اول و دوم تحلیل فرکانسی، هم چنین، $\omega_{\max}$ ، فرکانس متناظر با پیک تحلیل فرکانسی است (در بین دو فرکانس، فرکانس نزدیک تر به فرکانس ۵/۲۲ هرتز در نظر گرفته می شود). با ثابت در نظر گرفتن دیگر پارامترها، پارامترهای در نظر گرفته شده برای بهینه سازی شامل موارد زیر هستند:

optimization parameters: (۱۶)

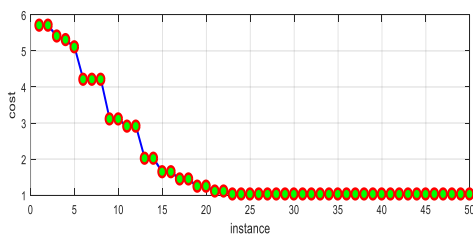
$$[L_1, L_2, L_3, L_4, L_{ob}]$$

۵-۳. بهینه سازی با استفاده از مدل خطی شده

در گام اول، بهینه سازی بر مبنای مدل خطی صورت می گیرد، استفاده از این مدل نسبتاً غیردقیق بوده ولی بهینه سازی با آن، نسبت به مدل غیرخطی با سرعت بیشتری صورت می گیرد. ۴۰، فرایند همگرایی بهینه سازی دامن شناور بر مبنای مدل خطی را نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود، میزان تابع هزینه تعریف شده در گام های نهایی به یک مقدار ثابت ۱/۱ همگرا شده است. پارامترهای بهینه بر مبنای این مدل را نشان می دهد. مقایسه ای

از دقت زیادی برخوردار می‌باشد، بنابراین در بازه فرکانسی بالا، نتایج به‌دست‌آمده از این مدل، برای استفاده در کاربردهای عملی پیشنهاد می‌شود.

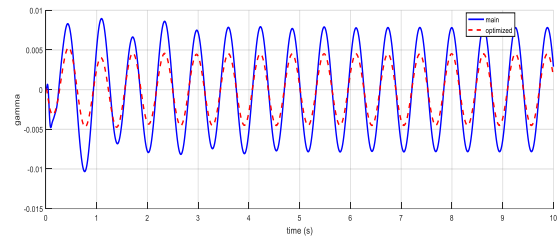
شکل ۱۱، فرایند همگرایی بهینه‌سازی دامن شناور بر مبنای مدل غیرخطی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان تابع هزینه تعریف شده در گام‌های نهایی به یک مقدار ثابت ۱/۱ همگرا شده است. جدول ۴ پارامترهای بهینه بر مبنای این مدل را نشان می‌دهد. مقایسه‌ای بین تحلیل دینامیکی شناور بهینه‌شده و شناور ۳۷ تنی در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶، نشان می‌دهد که در یک اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه، دامنه نوسانات شناور بهینه‌شده خیلی کمتر از شناور ۳۷ تنی می‌باشد. برای تحلیل دقیق‌تر و مقایسه بین رفتار شناور بهینه‌شده و شناور ۳۷ تنی، شکل ۱۷، به مقایسه تحلیل فرکانسی بین شناور بهینه‌شده و شناور اصلی می‌پردازد، همان‌طور که از این شکل قابل استنتاج است، اگرچه بهینه‌سازی بر مبنای دو پیک تحلیل فرکانسی و فرکانس متناظر با آن صورت گرفته ولی به‌جز در محدوده فرکانسی خیلی پایین، دامنه نوسانات شناور بهینه‌شده خیلی کمتر از شناور ۳۷ تنی می‌باشد.



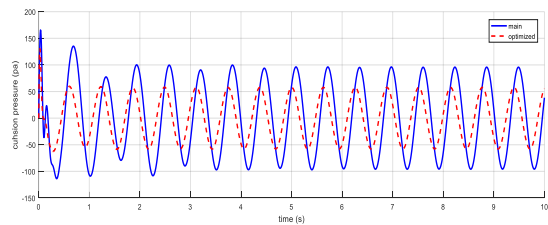
شکل ۱۱. فرایند همگرایی به جواب

جدول ۴. پارامترهای بهینه‌شده بر مبنای مدل غیرخطی

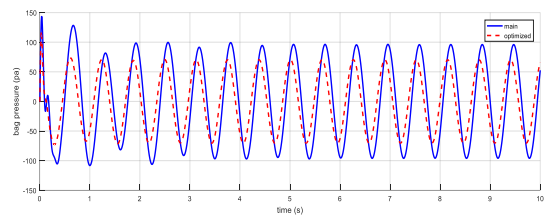
L_{x1}	L_{x2}	L_{x3}	L_{x4}	L_{ob}	Cost
۰.۰۲۰۰	۲.۵۴۰۰	۲.۴۵۰۰	۰.۸۸۵۴	۳.۳	۱.۰۱۸۳۹۴



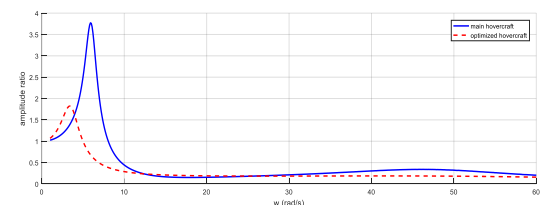
شکل ۷. مقایسه درجه آزادی ۷، شناور ۳۷ تنی و بهینه‌شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



شکل ۸. مقایسه تغییرات فشار محفظه بالشتک مربوط به شناور ۳۷ تنی و بهینه‌شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



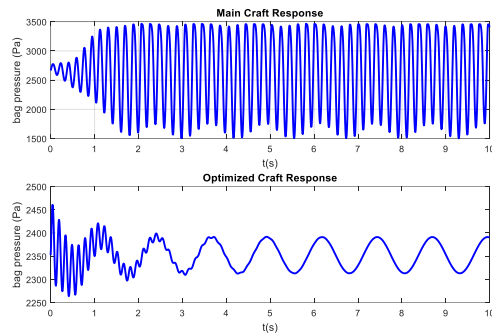
شکل ۹. مقایسه تغییرات فشار محفظه کیسه مربوط به شناور ۳۷ تنی و بهینه‌شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



شکل ۱۰. مقایسه پاسخ فرکانسی شناور بهینه‌شده با شناور اصلی

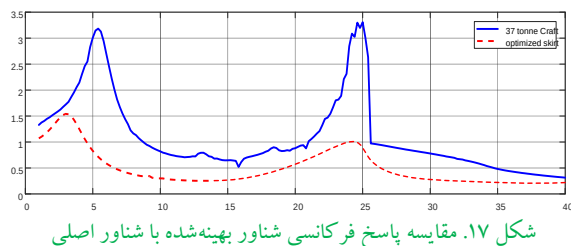
۴-۵. بهینه‌سازی با استفاده از مدل غیرخطی

همان‌طور که عنوان شد، استفاده از این مدل برای بهینه‌سازی، مدت‌زمان بهینه‌سازی را به علت زمان اجرای زیاد به‌شدت افزایش می‌دهد، با این حال، با توجه به آنکه مدل‌سازی با استفاده از معادلات غیرخطی حاکم بر مسئله



شکل ۱۶. مقایسه تغییرات فشار محفظه کیسه مربوط به شناور ۳۷ تنی و

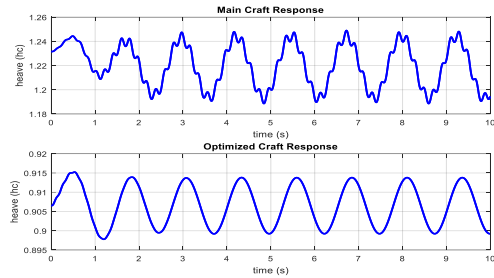
بهینه شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



شکل ۱۷. مقایسه پاسخ فرکانسی شناور بهینه شده با شناور اصلی

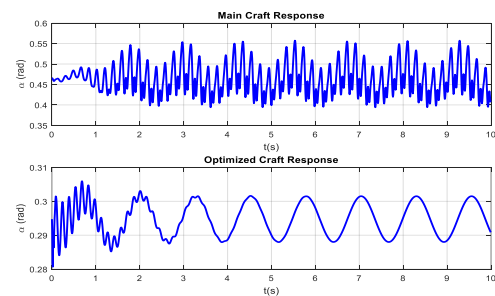
۶. نتیجه گیری

با انجام تحلیل فرکانسی و با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی متفاوت دامن، دو پیک فرکانسی در رفتار فرکانسی دامن مشاهده می شود که میزان این دو پیک و هم چنین، فرکانس های متناظر با این دو پیک فرکانسی، با افزایش یا کاهش پارامترهای هندسی دامن تغییر می کند. از کارهای مهم صورت گرفته در این بخش، بهینه سازی هندسی دامن بر اساس میزان پیک های رفتار فرکانسی شناور و هم چنین، فرکانس های متناظر با این دو پیک می باشد، به گونه ای که با استفاده از الگوریتم PSO علاوه بر اینکه میزان پیک نوسانات شناور به طور کلی کمینه می شود، فرکانس های متناظر با این دو پیک نیز از فرکانس حساسیت انسان دور می شود. این بخش از نظر طراحی اهمیت زیادی دارد، چراکه با طراحی وسیله بر مبنای آن می توان از عملکرد دینامیکی دامن و هوانا و اطمینان حاصل نمود.



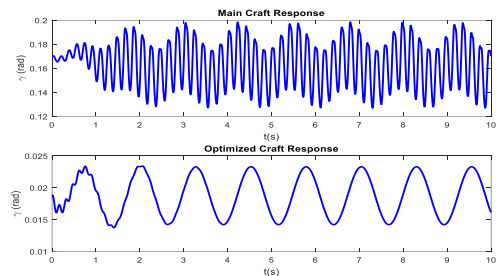
شکل ۱۲. مقایسه حرکت عمودی شناور ۳۷ تنی و بهینه شده در اغتشاش

با فرکانس ۵ رادیان بر ثانیه بر اساس مدل غیرخطی



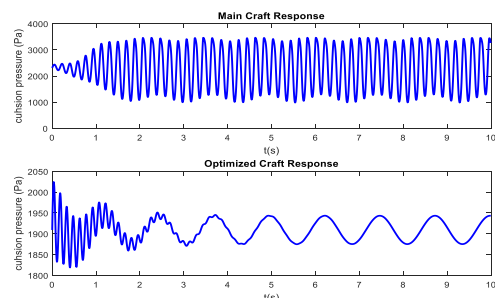
شکل ۱۳. مقایسه درجه آزادی α ، شناور ۳۷ تنی و بهینه شده در اغتشاش

با فرکانس ۵ رادیان بر ثانیه بر اساس مدل غیرخطی



شکل ۱۴. مقایسه درجه آزادی، شناور ۳۷ تنی و بهینه شده در اغتشاش با

فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات فشار محفظه بالشتک مربوط به شناور ۳۷ تنی

و بهینه شده در اغتشاش با فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه

Identification. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2018;26(3):785-96.

- [10]de Suza DP, Chapoutot A. Appropriate Design Guided by Simulation: An Hovercraft Application. In Proceedings of the 3rd Workshop on Model-Driven Robot Software Engineering 2016;pp. 1-8.
- [11]Ab Rashid MZ, Shah HNM, Aras MSM, Sulaiman M, Latif MFA. Parameter Estimation and Verification of Unmanned Air Cushion Vehicle (UACV) System. In MATEC Web of Conferences 2017;97:01069.
- [12]Mantle PJ. Maximum lift-drag ratio of air cushion craft. The Aeronautical Journal. 2017;121(1239):693-709.
- [13]Reynolds A. A nonlinear theory for a hovercraft moving over regular waves. Journal of Mechanical Engineering Science. 1974;16(5):310-6.
- [14]Chung J, Sullivan P, Ma T, editors. Nonlinear heave dynamics of an air cushion vehicle bag and finger skirt. Flight Simulation Technologies Conference; 1999.
- [15]Crago W. Problems associated with the use of skirts on hovercraft. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division. 1967;182(1):201-18.

پی‌نوشت‌ها

1. Fingers
2. Drag
3. Lift
4. Chung
5. Sanders
6. NEW SOUTH WALES
7. Lu and Huang
8. Ji
9. Avanish
10. David Cebecinhas
11. Sandretto
12. Ab Rashid
13. Mantle

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی سازمان صنایع دریایی انجام شده است، بدین‌وسیله از همه کسانی که در انجام دادن این تحقیق ما را یاری کردند؛ کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [1]Hinchey MJ, Sullivan PA. On hovercraft overwater heave stability. Journal of sound and vibration. 1993;163(2):261-73.
- [2]Chung J. Theoretical investigation of heave dynamics of an air cushion vehicle bag and finger skirt Doctoral dissertation, National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada. 1998.
- [3]Sanders RMW. Control of a model sized hovercraft. The University of New South Wales Australia. 2003.
- [4]Lu J, Huang GL, Li SZ. A study of maneuvering control for an air cushion vehicle based on back propagation neural network. Journal of Shanghai Jiaotong University. 2009;14(4):482-5.
- [5]Fu TK, Faller WE, Hess DE. Using Soft Computing Technologies for the Simulation of LCAC Dynamics. NAVAL SURFACE WARFARE CENTER CARDEROCK DIV BETHESDA MD. 2011.
- [6]Ji N. Motion simulation of air cushion vehicle in beach-landing. In Fourth International Conference on Digital Image Processing International Society for Optics and Photonics. 2012;Vol. 8334, p. 83343J.
- [7]Sowayan AS, AlSaif KA. Investigation of the heave dynamics of Air Cushion Vehicles (ACV): parametric and chaotic studies. Latin American Journal of Solids and Structures. 2013;10(4):725-45.
- [8]Siddaramappa A. Rigid Formation Control using Hovercrafts. A Spatial Model Predictive Control Approach. 2015.
- [9]Cabecinhas D, Batista P, Oliveira P, Silvestre C. Hovercraft Control With Dynamic Parameters