مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 311-322

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

یک چارچوب جدید طراحی بهینه چند موضوعی مقاوم در طراحی مفهومی یک وسیله زیر سطحی خود گردان

محسن بیدکی[1]، مهدی مرتضوی*[2]، مهدی سبزه پرور[2]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران
2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران
*تهران، صندوق پستی15875-4413, mortazavi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 آذر 1396
پذیرش: 10 بهمن 1396
ارائه در سایت: 11 اسفند 1396

کلید واژگان:
طراحی بهینه چند موضوعی مقاوم
وسیله زیر سطحی خودگردان
امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی
طراحی هم‌زمان سیستم و تاکتیک

چکیده

در فرآیند طراحی یک وسیله زیر سطحی به مدل‌سازی ریاضی زیر سیستم‌ها/ موضوعات درگیر مانند هدایت وکنترل، محموله، هیدرودینامیک، پیشرانش، سازه، طراحی مسیر و عملکرد و روابط متقابل آن‌ها نیاز است. در فازهای ابتدایی طراحی این وسیله همواره متغیرهای طراحی و پارامترهای سیستم با درجه بالایی از عدم قطعیت روبه‌رو هستند. این عدم قطعیت‌ها باعث چالش در فرآیند طراحی شده و عملکرد وسیله را تحت تأثیر مستقیم قرار می‌دهند. روش‌های طراحی بهینه چند موضوعی رهیافتی جهت طراحی بهینه و امکان‌پذیر و روش‌های طراحی مقاوم رویکردی جهت طراحی غیرحساس نسبت به تغییرات متغییرهای طراحی هستند. ترکیب روش‌های طراحی بهینه چند موضوعی و روش‌های طراحی مقاوم با یکدیگر برای طراحی یک سیستم پیچیده از منظر بهینگی، امکان‌پذیری و مقاوم اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله یک روش بهینه‌سازی چند موضوعی مقاوم جهت طراحی مفهومی یک وسیله زیر سطحی خودگردان با در نظر گرفتن تاکتیک و سیستم به صورت هم‌زمان تحت عدم قطعیت‌های طراحی توسعه یافته است. برای این منظور روش امکان‌پذیر چند موضوعی غیرقطعی به عنوان چارچوب بهینه‌سازی چند موضوعی تحت عدم قطعیت معرفی می‌گردد، همچنین دو روش تکاملی مبتنی‌بر پارتو به عنوان دو روش بهینه‌سازی چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته و نتایج دو روش مقایسه می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد چارچوب جدید طراحی چند موضوعی بهینه مقاوم معرفی شده می‌تواند با دقت مناسب یک مجموعه طراحی مقاوم را برای یک وسیله زیر سطحی با زیر سیستم‌های غیرقطعی و کوپله را ارائه دهد.

A new robust multidisciplinary design optimization framework for conceptual design of an autonomous underwater vehicle

Mohsen bidoki, Mehdi Mortazavi*, Mehdi Sabzeparvar

Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
*P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mortazavi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 December 2017
Accepted 30 January 2018
Available Online 02 March 2018

Keywords:
MRDO
AUV
UMDF
Simultaneously tactic and system design

ABSTRACT

The design process of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) requires mathematical model of subsystems or disciplines such as guidance and control, payload, hydrodynamic, propulsion, structure, trajectory and performance and their interactions. In early phases of design, an AUV are often encountered with a high degree of uncertainty in the design variables and parameters of system. These uncertainties present challenges to the design process and have a direct effect on the AUV performance. Multidisciplinary Design Optimization (MDO) is an approach to find both optimum and feasible design and robust design is an approach to make the system performance insensitive to variations of design variables and parameters. It is significant to integrate robust design and MDO for designing complex engineering systems in optimal, feasible and robust senses. In this paper, an improved robust MDO methodology is developed for conceptual design of an AUV under uncertainty with considering tactic and system design simultaneously. In this methodology, Uncertain Multi-Disciplinary Feasible (UMDF) framework is introduced as uncertain MDO framework. Two evolutionary algorithms are also used as Pareto-based Multi-Objective optimizers and results of two algorithms are compared. The results of this research illustrate that the new proposed robust multidisciplinary design optimization framework can carefully set a robust design for an AUV with coupled uncertain disciplines.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از وسایل زیر سطحی خودگردان در بسیاری از فعالیت‌های تحقیقاتی از قبیل کاوش‌های زیرسطحی، جستجو در زیر سطح، عملیات نقشه برداری زیر سطحی و نبردهای دریایی گسترش یافته است. در طراحی چنین وسیله‌ای بسیاری از زمینه‌های مهندسی مانند هیدرودینامیک، پیشرانش، هدایت کنترل و ناوبری و طراحی سازه مشارکت دارند. پیچیدگی و تأثیر متقابل این موضوعات باعث افزایش بار محاسباتی و در نهایت زمانبری فرآیند طراحی خواهد شد. در سال‌های اخیر اغلب مهندسان جهت طراحی

Please cite this article using:
M. bidoki, M. Mortazavi, M. Sabzeparvar, A new robust multidisciplinary design optimization framework for conceptual design of an autonomous underwater vehicle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 311-322, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Archive of SID
www.SID.ir

سیستم‌های پیچیده به روش بهینه‌سازی چند موضوعی متمایل شده‌اند. مهندسان طراح می‌توانند با حل مسأله طراحی چند موضوعی به طور هم‌زمان بهبود طراحی و کاهش زمان و هزینه سیکل طراحی را به انجام برسانند.

چارچوب‌ها و معماری‌های طراحی چند موضوعی جهت استفاده از روش‌های عددی بهینه‌سازی در طراحی سیستم‌هایی توسعه یافته که در آن تعداد زیادی زیرسیستم یا موضوع درگیر است. نوع معماری مسأله بهینه‌سازی و روش بهینه‌سازی در زمان فرآیند بهینه‌سازی و همگرایی طراحی بهینه تأثیر می‌گذارد. در ادامه به بررسی فعالیت‌های انجام شده در حوزه طراحی وسیله زیر سطحی با روش طراحی چند موضوعی پرداخته می‌شود.

یوکیش و همکاران در سال 2000 به بررسی مزایا و معایب روش‌های مختلف بهینه‌سازی چند موضوعی از قبیل همه یک‌جا[1]، امکان‌پذیری موضوع منفرد[2] و امکان‌پذیری چند موضوعی[3] جهت بهبود طراحی مفهومی یک وسیله زیرسطحی پرداختند [1]. بلگاندو و همکاران در سال 2000 از بهینه‌سازی مشارکتی[4] به عنوان یک روش خودکار در طراحی مفهومی یک وسیله زیر سطح با موضوعاتی از قبیل توان (تأمین انرژی)، هدایت و کنترل و سیستم اندازه‌گیری استفاده نمودند [2]. چارلز و همکاران در سال 2002 بر پایه معماری امکان‌پذیری موضوع منفرد به طراحی یک وسیله زیر سطحی با موضوعاتی از قبیل هدایت کنترل، محموله، توان، هیدرودینامیک و با تابع هدف حداکثرسازی طول محموله پرداختند [3]. در سال 2008 پژوهشی توسط تاد و همکاران به انجام رسید که در آن طراحی و بهینه‌سازی یک وسیله زیر سطحی شامل سه ماژول طرح‌ریزی مسیر، انتخاب و چیدمان اجزا و تحلیل سازه در نظر گرفته شده است [4]. ژانگ و همکاران در سال 2013 از تئوری طراحی چند موضوعی بهینه برای طراحی سیستم هدایت یک وسیله زیرسطحی با استفاده از معماری امکان‌پذیری موضوع منفرد استفاده نمودند [5]. لو و لیو در سال 2015 با ترکیب روش بهینه‌سازی مشارکتی و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات به بهینه‌سازی عملکرد هیدرودینامیکی یک ربات زیر سطحی پرداختند [6].

در مراحل اولیه طراحی، مسأله طراحی یک وسیله زیرسطحی اغلب با درجه بالایی از عدم قطعیت در متغیرهای طراحی و پارامترهای سیستم مواجه است. در پروسه طراحی این عدم قطعیت‌ها بر کارآیی و قابلیت اطمینان وسیله زیر سطحی تأثیر می‌گذارد. اگر این عدم قطعیت‌ها در فرآیند طراحی به حساب آورده نشود، پس از طراحی سیستم در عمل کاهش شدید کارآیی و قابلیت اطمینان به وجود خواهد آمد. از این‌رو لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و انتشار عدم قطعیت در فرآیند طراحی بهینه یک وسیله زیر سطحی بسیار حائز اهمیت است.

طراحی بهینه مقاوم روشی است که به طور هم‌زمان بر بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش حساسیت عملکرد سیستم نسبت به عدم قطعیت‌ها می‌پردازد. در روش بهینه‌سازی مقاوم تحلیل مقاوم بودن بر تابع هدف و قیود طراحی انجام می‌گردد. مقاوم بودن تابع هدف به این معنی است که عملکرد سیستم در مقابل عدم قطعیت‌ها غیرحساس باشد و مقاوم بودن قیود به مفهوم این است که متغیرهای طراحی با وجود عدم قطعیت در سیستم در محدوده امکان‌پذیر باقی بمانند. تاگوچی در سال 1994 پایه‌های طراحی مقاوم را براساس دیدگاه شش سیگما برای دستیابی به کیفیت بالای محصول بنیان نهاد [7].

ترکیب روش طراحی مقاوم و بهینه‌سازی چند موضوعی برای بررسی هم‌زمان بهینگی و قابلیت اطمینان سیستم‌های مهندسی پیچیده اهمیت ویژه‌ای دارد. به تازگی لحاظ عدم قطعیت در بهینه‌سازی چند موضوعی و ایجاد ساختار جدید تحت عنوان بهینه‌سازی چند موضوعی غیرقطعی برای طراحی سیستم‌های مهندسی پیچیده مورد توجه قرار گرفته است.

طراحی بهینه مقاوم جهت طراحی وسایل مختلف و کاربردهای مختلف انجام شده است. برای مثال در سال 2005 چن و همکاران با معرفی روش بهینه‌سازی مقاوم زیر فضای هم‌زمان به تعیین طراحی بهینه مقاوم برای موشک‌های تاکتیکی به عنوان یک سیستم پیچیده با ابعاد وسیع پرداختند [8]. دیز و پری در سال 2010 یک روش جدید طراحی بهینه مقاوم جهت طراحی مفهومی یک کشتی باربر در حضور عدم قطعیت در شرایط عملیاتی و محیطی را ارائه نمودند [9]. زمان و ماهادوان در سال 2013 الگوریتمی برای طراحی بهینه چند موضوعی مقاوم برای یک ماهواره تحت عدم قطعیت شانسی و عدم قطعیت شناختی توسعه دادند [10]. در سال 2014 نوگین و همکاران یک روش بهینه‌سازی چند موضوعی مقاوم برای طراحی مفهومی یک پرنده بدون سرنشین را توسعه دادند [11].

اگرچه طراحی بهینه مقاوم به طور گسترده در کاربردهای مختلف و وسایل مختلف گزارش شده است، اما گزارش‌های بسیار کمی در حوزه طراحی مقاوم وسایل زیر سطحی منتشر شده است. برخی از این فعالیت‌های پژوهشی در زیر بیان گردیده است.

در سال 2002 مک آلیستر با لحاظ عدم قطعیت در متغیرهای طراحی، محیط عملیات و الزامات مشتری به انتشار عدم قطعیت و طراحی یک وسیله زیر سطحی خودگردان از روش طراحی چند موضوعی بهینه دو سطحی پرداخت [12]. فریتس و همکاران در سال 2004 یک روش جدید طراحی مقاوم برای یک سلاح زیرسطحی با استفاده از مفهوم احتمال موفقیت به عنوان یک متغیر مستقل استفاده نمودند تا یک ارزیابی چند هدفه مبتنی‌بر ریسک، هزینه و کارآیی انجام گردد [13]. در سال 2012 خایرول و همکاران یک چارچوب طراحی بهینه و طراحی بهینه مقاوم را برای یک زیردریایی کوچک ارائه نمودند [14].

بیشتر کارهای انجام شده در حوزه طراحی مقاوم وسیله زیرسطحی به یافتن طراحی بهینه مقاوم در چارچوب روش‌های سنتی منجر شده است.

در این مقاله به عنوان یک نوآوری در طراحی وسیله زیرسطحی خودگردان به طراحی مفهومی یک وسیله زیرسطحی از دو منظر سیستم (با موضوعات سونار، هیدرودینامیک، رانش و سازه) و منظر تاکتیک (با پارامترهایی چون برد، مداومت پروازی، احتمال کشف هدف، زمان کشف هدف) تحت عدم قطعیت در متغیرهای طراحی و پارامترهای سیستم با استفاده از چارچوب طراحی چند موضوعی بهینه مقاوم پرداخته شده است. در این روش ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی[5] به عنوان روش طراحی چند موضوعی تحت عدم قطعیت معرفی و دو الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه[6] و الگوریتم ژنتیک مبتنی‌بر طبقه‌بندی حل‌های غیرغالب[7] به عنوان دو روش بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی‌بر پارتو جهت بهینه‌سازی استفاده شده است.

در بخش بعد یک نگاه کلی به متودلوژی طراحی چند موضوعی بهینه در مواجهه با عدم قطعیت به ویژه معرفی روش امکان‌پذیری چند موضوعی

[1] All-At-Once
[2] Individual Discipline Feasible (IDF)
[3] Multidisciplinary Feasible (MDF)
[4] Collaborative Optimization (CO)
[5] Uncertain Multidisciplinary Feasible (UMDF)
[6] Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
[7] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

www.SID.ir
Archive of SID

غیرقطعی پرداخته شده است. دو روش بهینه‌سازی تکاملی جهت حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در بخش 3 به صورت مختصر معرفی شده‌اند. در بخش 4 فرمول‌های موضوعات درگیر در فاز طراحی مفهومی یک وسیله زیرسطحی خودگردان گردآوری شده است. پیاده‌سازی ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی و تعریف مسأله بهینه‌سازی مقید در بخش 5 توصیف شده است. نتایج عددی حاصل از پیاده‌سازی برای دو متغیر طراحی تحت عدم قطعیت در بخش 6 به صورت کامل بیان و در نهایت در بخش 7 خلاصه‌ای از پژوهش انجام شده به همراه جمع‌بندی و اشاره به فعالیت‌های آتی به طور خلاصه ارائه شده است.

2- طراحی بهینه چند موضوعی غیرقطعی

طراحی بهینه چند موضوعی رویکردی است که بر روش‌های بهینه‌سازی جهت طراحی سیستم‌هایی است که از زیرسیستم‌ها و موضوعات مختلف و اثرات متقابل بین این زیرسیستم‌ها و موضوعات متمرکز است. فرآیند طراحی سیستم‌های مهندسی پیچیده به فرمول‌بندی ریاضی این موضوعات و اثرات متقابل بین آن‌ها می‌پردازد. با حل مسائل طراحی بهینه چند موضوعی هزینه و زمان سیکل طراحی به طور هم‌زمان کاهش می‌یابد.

طراحی بهینه چند موضوعی در چارچوب‌ها و معماری‌های مختلف جهت فرمول‌بندی جدید مسائل بهینه‌سازی طراحی توسعه یافته‌اند تا از طریق آن‌ها پیچیدگی طراحی کاهش یافته و کارآیی روش‌های طراحی بهینه سنتی افزایش می‌یابد. انتخاب نوع معماری طراحی بهینه چند موضوعی و نوع بهینه‌سازی وابسته به پیچیدگی سیستم، موضوعات مورد نیاز، میزان بار محاسباتی، میزان همگرایی به پاسخ بهینه و بهبود امکان‌پذیری طراحی است.

معماری‌های طراحی بهینه چند موضوعی به دو دسته معماری‌های یکپارچه[1] (تک سطحی) و معماری‌های توزیع شده[2] (چند سطحی) تقسیم‌بندی می‌شود. در روش‌های یکپارچه یک مسأله بهینه‌سازی حل می‌شود که در این راستا می‌توان به روش‌هایی چون همه یک‌جا، امکان‌پذیری موضوع منفرد، امکان‌پذیری چند موضوعی اشاره نمود. در روش‌های توزیع شده مسأله طراحی به زیر مسائل کوچک‌تری شکسته شده که هر زیرمسأله خود شامل مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی و قیود است. روش‌های بهینه‌سازی مشارکتی، سنتز سیستم یکپارچه دو سطحی[3] و بهینه‌سازی زیر فضای هم‌زمان[4] به عنوان مشهورترین روش‌های توزیع شده هستند.

در این پژوهش ما نیاز داریم تا امکان‌پذیری طراحی در هر حالت برقرار باشد، حتی اگر فرآیند بهینه‌سازی به هر نحو متوقف گردد. به معنای دیگر ما به دنبال یافتن نقطه بهینه طراحی از منظر مهندسی هستیم نه یک نقطه بهینه از منظر محض ریاضی. از این‌رو روش امکان‌پذیری چند موضوعی بهترین انتخاب در بین معماری‌های مختلف برای دستیابی به چنین هدفی است، زیرا در این معماری قیود طراحی در هر مرحله از بهینه‌سازی همواره ارضا شده و طراحی به دست آمده همواره امکان‌پذیر خواهد بود، حتی در صورتی که فرآیند بهینه‌سازی به هر نحو متوقف شود.

در معماری امکان‌پذیری چند موضوعی مسأله بهینه‌سازی تا آن‌جا که ممکن است کوچک‌تر شده است، زیرا بهینه‌ساز فقط متغیرهای طراحی، تابع هزینه و قیود طراحی را تحت کنترل مستقیم قرار می‌دهد. در این معماری یک مجموعه از متغیرهای کوپلینگ محاسبه و جهت ارزیابی تابع هزینه و قیود طراحی به سطح بهینه‌سازی پیش از هر تکرار بهینه‌سازی بازخورد می‌شود. این خاصیت باعث کاهش نرخ همگرایی می‌گردد. البته با جابه‌جایی موضوعات به نحوی که کمترین حلقه بازخورد در معماری امکان‌پذیری چند موضوعی ایجاد گردد (بازخورد متغیرهای خروجی یک موضوع به موضوعات دیگر در سطح بالاتر) می‌توان نرخ همگرایی این روش را بهبود بخشید، همچنین محاسبات گرادیانت در روش امکان‌پذیری چند موضوعی معمولاً از روش‌های همه یک‌جا و امکان‌پذیری موضوع منفرد سخت‌تر است که در صورت استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرمبتنی‌بر گرادیانت این مشکل به نحو قابل ملاحظه‌ای حل شده و در نهایت طراحی بهینه و امکان‌پذیر به طور هم‌زمان از این روش استخراج خواهد گردید.

روش‌های بهینه‌سازی طراحی در یک تقسیم‌بندی به دو رویکرد قطعی با متغیرهای طراحی نامی و رویکرد مقاوم با تغییر در متغیرهای طراحی، توابع هدف و قیود طراحی تقسیم‌بندی می‌گردند. در رویکرد بهینه‌سازی مقاوم، مقاوم بودن تابع هدف و قیود مد نظر قرار دارد و باعث غیرحساس شدن عملکرد سیستم نسبت به عدم قطعیت‌ها می‌گردد.

ترکیب هم‌زمان طراحی مقاوم و طراحی بهینه چند موضوعی جهت طراحی بهینه و قابل اطمینان سیستم‌های پیچیده موضوعی ارزشمند و قابل توجه است. روش بهینه‌سازی چند موضوعی غیرقطعی یک چارچوب مؤثر و کارآ است که ابعادی از قبیل تحلیل موضوعات، تحلیل عدم قطعیت، بهینه‌سازی سیستم تحت عدم قطعیت و ارزیابی قیود تحت عدم قطعیت را دربرمی‌گیرد. مسائل مهم در جهت تحقق رویکرد بهینه‌سازی چند موضوعی غیرقطعی برای یک سیستم با ابعاد وسیع و پیچیده، چگونگی سازماندهی مسأله در یک ساختار جامع و چگونگی انتشار عدم قطعیت از یک موضوع در موضوعات دیگر است.

در یک تقسیم‌بندی کلی دو رویکرد اصلی برای مسائل بهینه‌سازی چند موضوعی غیرقطعی وجود دارد:

1- رویکرد مبتنی‌بر امکان‌پذیری چند موضوعی[5]

2- رویکرد مبتنی‌بر تجزیه[6]

در رویکرد مبتنی‌بر امکان‌پذیری چند موضوعی، انتشار عدم قطعیت برای یک سیستم جامع چند موضوعی به صورت یک‌جا انجام می‌شود. در این رویکرد امکان‌پذیری کل سیستم در حضور عدم قطعیت تضمین می‌گردد. در رویکرد مبتنی‌بر تجزیه، انتشار عدم قطعیت برای هر موضوع به صورت مجزا انجام شده و در نهایت مقاوم بودن کل سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با توجه به انتخاب چارچوب امکان‌پذیری چند موضوعی قطعی به دلایل عنوان شده در ابتدای بخش در حالت وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم روش امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی جهت انتشار عدم قطعیت در سیستم چند موضوعی انتخاب می‌گردد.

2-1- فرمول‌بندی روش امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی

یک مسأله بهینه‌سازی قطعی در معماری امکان‌پذیری چند موضوعی به صورت رابطه (1) فرمول‌بندی می‌شود.

$$\begin{aligned} \min_{x=[x_0,x_k]} \quad & f\left(x_0, x_k, y_i\left(x_0, x_k, y_{j\neq i}\right)\right) \\ \text{S.t} \quad & g_i\left(x_0, x_k, y_i\left(x_0, x_k, y_{j\neq i}\right)\right), i = 1, \dots, N \end{aligned} \tag{1}$$

در رابطه (1)، x_0 بردار متغیرهای طراحی مشترک، x_k بردار متغیرهای محلی و y_i بردار متغیرهای خروجی موضوعات مختلف است. توابع f و g_i به

[1] Monolithic architectures
[2] Distributed architectures
[3] Bi-Level Integrated System Synthesis (BLISS)
[4] Concurrent SubSpace Optimization (CSSO)
[5] Multidisciplinary Feasible approach
[6] Decomposition approach

Archive of SID
www.SID.ir

ترتیب تابع هدف و قیود طراحی هستند. در ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی، کنترل فقط بر بردار متغیرهای طراحی (مشترک و محلی)، $x = [x_0, x_k], k = 1, \dots, n_x$ اعمال می‌گردد و تحلیل موضوعات که معادلات حاکم بر موضوعات را توصیف می‌کند $(D_i \ , i = 1, \dots, n_y)$ می‌تواند به شکل رابطه (2) باشد.

$$y_i = D_i(y_{j\,(j\neq i)}, x) \tag{2}$$

هدف اصلی در طراحی بهینه مقاوم، یافتن بهترین نقطه طراحی است که در آن توابع هدف و قیود طراحی کمترین تغییرات را داشته باشند. با این توصیف معمولاً دو دیدگاه در طراحی چند موضوعی بهینه مقاوم وجود دارد: یکی مقاوم بودن تابع هدف و دیگری مقاوم بودن قیود طراحی. در رویکرد مقاوم بودن تابع هدف، سعی می‌شود عملکرد سیستم نسبت به تغییر در متغیرها و پارامترهای طراحی غیرحساس گردد، در حالی که در مقاوم بودن قیود سعی می‌شود نقطه بهینه طراحی تحت عدم قطعیت‌ها همواره در ناحیه امکان‌پذیر قرار گیرد.

در این مقاله تنها مقاوم‌سازی تابع هدف در نظر گرفته شده و قیود طراحی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ارزیابی می‌گردند.

یک مسأله مقاوم‌سازی تابع هدف را می‌توان به صورت یک مسأله بهینه‌سازی چند متغیره در نظر گرفت. این مفهوم به طور گسترده به صورت یک رابطه تعاملی بین مقدار میانگین و انحراف معیار تابع هدف در ادبیات این موضوع رایج است. در صورتی که موضوعات مختلف با تغییر در متغیرهای طراحی مواجه باشند، آن‌گاه تحلیل موضوعات را می‌توان به شکل معادله (3) در نظر گرفت.

$$y_i = D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0 + \Delta_{y_j}, x^0 + \Delta_x) + \Delta_{\varepsilon y_i} \tag{3}$$

در رابطه بالا $\Delta_x = x - x_0$ و $\Delta_{y_j} = y_j - y_{j_0}$ به ترتیب عدم قطعیت متغیرهای طراحی و عدم قطعیت متغیرهای خروجی به عنوان عدم قطعیت‌های داخلی برای موضوع i-ام و $\Delta_{\varepsilon y_i} = \varepsilon y_i - \varepsilon y_{i0}$ عدم قطعیت خارجی متغیرهای خروجی است. تمامی عدم قطعیت‌ها به صورت پارامترهای تصادفی با توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیارهای $\sigma_x, \sigma_{y_{j\,(j\neq i)}}, \sigma_{\varepsilon y_i}$ فرض می‌گردد.

در این پژوهش مقدار میانگین و انحراف معیار متغیرهای خروجی و تابع معیار با استفاده از بسط مرتبه اول تیلور تقریب زده می‌شود. در نهایت تحلیل موضوعات مطرح شده در معادله (3) با استفاده از بسط مرتبه اول تیلور به صورت رابطه (4) تقریب زده می‌شود.

$$y_i = D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0) + \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial x_k} \Delta_{x_k} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n_y} \frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial y_j} \Delta_{y_j} + \Delta_{\varepsilon y_i} \tag{4}$$

در رابطه (4)، x^0 و $y_{j\,(j\neq i)}^0$ به ترتیب بردارهای مقادیر نامی متغیرهای طراحی و متغیرهای خروجی است که مشتقات نسبت به آن‌ها محاسبه می‌شود. طبق رابطه (4) عدم قطعیت متغیرهای طراحی $(\mu_{x_k} = x_{k0}, \sigma_{x_k})$، عدم قطعیت‌های خروجی $(\mu_{y_j}, \sigma_{y_j} \ , j \neq i)$ و عدم قطعیت‌های داخلی $(\mu_{\varepsilon y_i} = 0, \sigma_{\varepsilon y_i})$ در فرآیند انتشار عدم قطعیت از طریق بسط مرتبه اول تیلور استخراج می‌گردد. در این فرآیند انتشار عدم قطعیت، مقدار میانگین و مقدار انحراف معیار متغیرهای خروجی از روابط (6,5) تقریب زده می‌شود.

$$\mu_{y_i} = E(y_i) = E(D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0))$$

$$+ \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial x_k} E(\Delta_{x_k}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n_y} \frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial y_j} E\left(\Delta_{y_j}\right) + E(\Delta_{\varepsilon y_i}) = D_i\left(\mu_{y_{j\,(j\neq i)}^0}, \mu_{x^0}\right) v \tag{5}$$

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_x} \left(\frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{x_k}^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n_y} \left(\frac{\partial D_i(y_{j\,(j\neq i)}^0, x^0)}{\partial y_j}\right)^2 \sigma_{y_j}^2 + \sigma_{\varepsilon y_i}^2} \tag{6}$$

در فرآیند انتشار عدم قطعیت فرض می‌شود که تمام متغیرها و پارامترهای تصادفی از یکدیگر مستقل هستند.

با توجه به تعریف معماری امکان‌پذیری چند موضوعی به عنوان مسأله بهینه‌سازی قطعی و محاسبات مربوط به فرآیند انتشار عدم قطعیت، معماری امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی طبق رابطه (7) قابل توصیف است.

$$\begin{aligned} &\min_{x=[x_0,x_k]} \quad F = [\mu_f(\mu_x, \mu_y) \ \ , \ \ \sigma_f(\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y)] \\ &\text{S.t} \qquad\quad g_i\left(\mu_{x_0}, \mu_{x_i}, \mu_{y_i}\left(\mu_{x_0}, \mu_{x_i}, \mu_{y_{j\neq i}}\right)\right), i = 1, \dots, N \end{aligned} \tag{7}$$

در رابطه (7) $\mu_x = [\mu_{x_0}, \mu_{x_1}, \dots, \mu_{x_k}]$ و $\mu_y = [\mu_{y_1}, \mu_{y_2}, \dots, \mu_{y_i}]$ به ترتیب بردار میانگین متغیرهای طراحی و بردار میانگین متغیرهای خروجی موضوعات است. همچنین $\sigma_x = [\sigma_{x_0}, \sigma_{x_1}, \dots, \sigma_{x_k}]$ و $\sigma_y = [\sigma_{y_1}, \sigma_{y_2}, \dots, \sigma_{y_i}]$ به ترتیب بردار انحراف معیار متغیرهای طراحی و بردار انحراف معیار متغیرهای خروجی موضوعات است.

در این ساختار برای داشتن یک طراحی امکان‌پذیر بلوک تحلیل موضوعات غیرقطعی[1] در هر تکرار بین موضوعات غیرقطعی و بهینه‌ساز قرار می‌گیرد. فرآیند انتشار عدم قطعیت (محاسبه مقدار میانگین و انحراف معیار تمام متغیرها) بر کل سیستم چند موضوعی نیز توسط این بلوک به انجام می‌رسد تا بدین‌وسیله امکان‌پذیری موضوعات در مواجه با عدم قطعیت لحاظ گردد. تحلیل موضوعات غیرقطعی در هر مرحله از بهینه‌سازی آن‌قدر تکرار می‌گردد تا پاسخ سیستم به همگرایی لازم برسد. برای مثال الگوریتم امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی برای سه موضوع در جدول 1 توصیف و به صورت شماتیک در شکل 1 نمایش داده شده است.

3- بهینه‌سازی چند هدفه

همان‌گونه که پیشتر بیان شد و در رابطه (6) نیز مشاهده می‌شود فرآیند طراحی بهینه مقاوم یک فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه (دو هدفه) است. در یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه تعداد زیادی تابع هدف درگیرند که بر یکدیگر تأثیرگذار نیز هستند. یافتن متغیرهای طراحی که تمامی توابع هدف را بهینه و قیود را نیز ارضا نمایند برای طراحان بسیار مهم است. برای حل یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه دو دیدگاه کلی وجود دارد. در نخستین دیدگاه که به مسأله بهینه‌سازی اسکالر معروف است، یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه به یک مسأله بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل می‌شود. روش‌هایی چون مجموع وزن‌دار[2]، برنامه‌ریزی هدف[3]، روش چبیشف[1]، برنامه‌ریزی

[1] Uncertain MultiDisciplinary Analysis (UMDA) block
[2] Weighted Sum
[3] Goal Programming

www.SID.ir
Archive of SID

جدول 1 الگوریتم امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی برای سه موضوع

Table 1 The Uncertainty Multidisciplinary Feasible (UMDF) algorithm for three disciplines

1	مقداردهی اولیه بردار متغیرهای طراحی ($\mu_x{}^0$) با توجه به بردار عدم قطعیت‌ها (σ_x)
	حلقه تکرار (حلقه بهینه‌سازی چند هدفه)
2	مقداردهی اولیه حلقه تحلیل موضوعات غیرقطعی و محاسبه $\mu_y{}^0, \sigma_y{}^0$
	حلقه تکرار (حلقه امکان‌پذیری غیرقطعی)
3	تحلیل غیرقطعی موضوع (1) و به‌روزرسانی μ_{y_1}, σ_{y_1}
4	تحلیل غیرقطعی موضوع (2) و به‌روزرسانی μ_{y_1}, σ_{y_1}
5	تحلیل غیرقطعی موضوع (3) و به‌روزرسانی μ_{y_1}, σ_{y_1}
6	تکرار گامهای 3 تا 6 تا همگرایی تحلیل موضوعات و دستیابی به متغیرهای امکان‌پذیر $(\bar{\mu}_{y_1}, \bar{\mu}_{y_2}, \bar{\mu}_{y_3}), (\bar{\sigma}_{y_1}, \bar{\sigma}_{y_2}, \bar{\sigma}_{y_3})$
7	ارزیابی توابع هدف و قیود- انتشار عدم قطعیت در توابع هدف و قیود و محاسبه μ_f, σ_f
8	تکرار گام 2 تا 8 تا همگرایی بهینه‌ساز چند هدفه و دستیابی به متغیرهای بهینه $(\mu_x{}^*, \mu_{y_1}{}^*, \mu_{y_2}{}^*, \mu_{y_3}{}^*)$

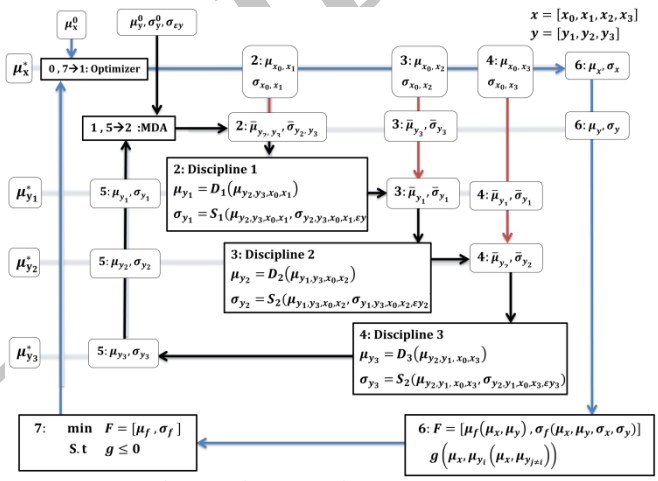

Fig. 1 Structure of UMDF framework for three disciplines

شکل 1 ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی برای سه موضوع

فیزیکی[2] از مشهورترین روش‌هایی هستند که در این دیدگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیدگاه دوم که مشهور به دیدگاه مبتنی‌بر پارتو[3] است، به طور مستقیم براساس طبیعت چند هدفه توابع هدف بنیان نهاده شده است. در این دیدگاه بهینه‌سازی k تابع هدف به طور هم‌زمان به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده و مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به جای یک پاسخ بهینه منحصر به فرد حاصل می‌گردد. تئوری بهینگی پارتو جهت یافتن این مجموعه از پاسخ‌های بهینه که به مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو[4] مشهور است به کار می‌رود. این روش به طراحان این اجازه را می‌دهد که در یک فرآیند تعاملی بین توابع هدف بهترین پاسخ بهینه را انتخاب کنند.

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه سنتی ممکن است به دلیل پیچیدگی‌هایی چون ابعاد وسیع فضای بهینه‌سازی، عدم قطعیت‌ها و گسستگی در مرز پارتو[5] محدود گردند. در سال‌های اخیر روش‌های تکاملی جهت حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا با یک بار اجرای این الگوریتم‌ها یک مجموعه از پاسخ‌های ممکن به طور هم‌زمان حاصل می‌شود. الگوریتم ژنتیک که توسط هولند [15] و الگوریم ازدحام ذرات که توسط کندی و ابرهارت [16] ابداع شدند از مشهورترین روش‌های ابتکاری است که در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از مشهورترین الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی‌بر الگوریتم ژنتیک، روش الگوریتم ژنتیک با طبقه‌بندی حل‌های غیرغالب که توسط دب و همکاران [17] توسعه یافته است، می‌باشد.

روش ازدحام ذرات یک روش بهینه‌سازی ابتکاری است که براساس رفتار اجتماعی گروهی از پرندگان و یا دسته‌ای از ماهی‌ها طرح‌ریزی گردیده است. روش ازدحام ذرات برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی‌بر پارتو نیز توسعه یافته است. در نسخه چند هدفه این الگوریتم که الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه نامیده می‌شود و توسط سریا و کوالو [18] توسعه داده شده است، یک حل غیرغالب (بهترین موقعیت) که رهبر نامیده می‌شود، جهت هدایت دیگر ذرات برگزیده شده و بدین ترتیب در هر تکرار حل‌های غیرغالب دیگر تولید شده و در نهایت مرز پارتو (آرشیو خارجی) تعیین می‌گردد.

3-1- بهینه‌سازی تحت قید

مسائل بهینه‌سازی به ندرت به صورت غیرمقید در نظر گرفته می‌شود و معمولاً در عمل چندین قید طراحی که عمدتاً به صورت غیرخطی نیز هستند در مسائل بهینه‌سازی وجود دارد. این قیود به شکل قیود مساوی[6] و یا قیود نامساوی[7] ظاهر شده و مسائل بهینه‌سازی تحت قید را مطابق فرمول‌بندی رابطه (8) به وجود می‌آورند.

$$\begin{array}{lll} \min & f(x) & X_L \le x \le X_U \\ \text{S.t} & g_k(x) \le 0 & k = 1, \dots, m \\ & h_l(x) = 0 & l = 1, \dots, p \end{array} \quad (8)$$

در رابطه (8) $g_k(x)$ و $h_l(x)$ به ترتیب k-امین قید نامساوی و l-امین قید مساوی بوده که در حالت عمومی می‌توانند به صورت غیرخطی باشند. یکی از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی مقید اضافه کردن یک تابع جریمه[8] که تابعی از قیود است به تابع هدف اصلی مسأله بهینه‌سازی و تشکیل تابع هدف افزوده[9] است. در این مفهوم سعی می‌شود تخطی از قیود همراه با تابع هدف حداقل گردد.

در این پژوهش از تابع جریمه مرتبه دوم خارجی[10] که توسط رائو [19] توصیف شده به شکل رابطه (9) استفاده شده است.

$$\varphi_q(x, r_I, R_I) = f_q(x) + r_I \times \sum_{k=1}^{m} (\max(g_k(x), 0))^2 + R_I \times \sum_{l=1}^{p} (h_l(x))^2 \quad (9)$$

در رابطه (9) $\varphi_q(x, r_I, R_I)$، q-امین تابع هدف افزوده و r_I و R_I ضرائب جریمه هستند.

4- مدل‌سازی موضوعات

در این پژوهش یک وسیله زیرسطحی خودگردان با پنج زیرسیستم و موضوع شامل سونار، هیدرودینامیک، توان/ رانش، سایزینگ/ سازه و تاکتیک در نظر گرفته شده است. در فاز طراحی مفهومی هدف فرمول‌بندی دقیق هر یک از موضوعات یادشده به صورت دقیق نیست، بلکه کلیات هر موضوع به عنوان

[1] Tchebycheff Method
[2] Physical Programming
[3] Pareto-based Approach
[4] Pareto-optimal Solution Set
[5] Pareto-frontier

[6] Equality Constraints
[7] Inequality Constraints
[8] Penalty Function
[9] Augmented Objective Function
[10] Quadratic Exterior Penalty Function

Archive of SID
www.SID.ir

قوانین طراحی مد نظر قرار گرفته که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود.

4-1- سونار

در این موضوع جستجوگر وسیله جهت تشخیص هدف به صورت یک سونار غیرفعال[1] در نظر گرفته می‌شود. برای داشتن خاصیت فرمدهی پرتو و میدان دید وسیع‌تر از آرایه‌ای از سنسورهای آکوستیکی در سونارهای غیرفعال استفاده می‌شود. این آرایه سونواری به صورت یک آرایه مسطح دایره‌ای با قطر D_s است که در قسمت دماغه وسیله نصب می‌شود. یکی از متغیرهای طراحی سونار پهنای پرتو[2] است. این متغیر طراحی جهت تعریف ناحیه جستجو سونار استفاده می‌شود. تعیین اندازه آرایه سونار (طول و ارتفاع و قطر دماغه) اولین گام در پروسه طراحی سونار است. ابعاد و اندازه آرایه سونار تابعی از طول موج، پهنای پرتو افقی (BW_{h}) و پهنای پرتو عمودی (BW_{v}) است که طبق مجموعه روابط (10) قابل محاسبه است [20].

$$L_{\mathrm{xa}} = \frac{25.3 \times \lambda}{(BW_{\mathrm{h}}/2)} \tag{10-a}$$

$$L_{\mathrm{ya}} = \frac{25.3 \times \lambda}{(BW_{\mathrm{v}}/2)} \tag{10-b}$$

$$D_{\mathrm{s}} = \sqrt{2} \times \max\left(L_{\mathrm{xa}}, L_{\mathrm{ya}}\right) \tag{10-c}$$

در روابط (10) λ طول موج سونار است که با توجه به فرکانس سونار (در این پژوهش $\mathrm{Fr} = 30\ \mathrm{KHz}$ و سرعت صوت در آب دریا $(\mathrm{c} = 1480\ \mathrm{m/s})$ طبق رابطه (11) قابل محاسبه است.

$$\lambda = \frac{\mathrm{c}}{\mathrm{Fr}} \tag{11}$$

متغیر دیگر سونار شاخص جهت‌مندی[3] است که میزان قدرت سونار یا میزان توانایی سونار در تشخیص هدف از نویز پس‌زمینه را نشان می‌دهد. شاخص جهت‌مندی را می‌توان طبق رابطه (12) با توجه به ابعاد آرایه سونواری و طول موج سونار تقریب زد.

$$DI = 10 \log\left(4 \frac{L_{\mathrm{xa}} \times L_{\mathrm{ya}}}{\lambda^2}\right) \tag{12}$$

حال با داشتن سطح نویز هدف[4]، سطح نویز محیط[5]، سطح آستانه[6] و شاخص جهت‌مندی (همه پارامترها برحسب دسی‌بل) باید به حل معادله سونار پسیو بپردازیم. طبق رابطه سونار پسیو، رابطه (13)، شاخص جهت‌مندی (برحسب دسی‌بل) به طور مستقیم با برد سونار (برحسب متر) ارتباط دارد [20,13].

$$20 \log(DR) + a \times DR \times 10^{-3} = SL - NL + DI - DT \tag{13}$$

در رابطه بالا a ضریب جذب آب دریاست که طبق رابطه (14) با توجه به فرکانس سونار محاسبه می‌گردد.

$$a = \frac{0.109 \times \mathrm{Fr}^2}{1 + \mathrm{Fr}^2} + \frac{43.76 \times \mathrm{Fr}^2}{4100 + \mathrm{Fr}^2} + 2.9705 \times 10^{-4} \times \mathrm{Fr}^2 + 0.0033 \tag{14}$$

دو متغیر طراحی سونار یعنی شاخص جهت‌مندی و پهنای پرتو به صورت معکوس با یکدیگر رابطه دارند. در واقع سونار با برد بیشتر دارای پهنای پرتو باریک‌تر است، حال آن‌که سونار با محدوده دید وسیع‌تر دارای شاخص جهت‌مندی کمتر و برد کوتاه‌تر است.

4-2- هیدرودینامیک

در این موضوع محاسبات نیروی پسا[7] و برآ[8] و همچنین معادلات پایداری طولی وسیله در نظر گرفته می‌شود. فرم بدنه و بالک‌ها و نیروهای وارد بر وسیله در شکل 2 نمایش داده شده است.

4-2-1- ضریب پسا

نیروی پسا برای یک وسیله زیرآبی معمولاً شامل دو بخش پسای اصطکاکی که تابعی از سرعت و سطح خیس[9] شده وسیله و پسای فشاری که تابعی از شکل و سطح پیشانی[10] وسیله است [22,21].

پسای اصطکاکی به وسیله تنش برشی ناشی از لایه مرزی حاصل از جریان سیال لزج در هنگام عبور بر بدنه وسیله به وجود می‌آید و بسته به عدد رینولدز و توزیع فشار بر بدنه که رژیم جریان را تعیین می‌نماید به دست می‌آید. پسای فشاری برای یک جسم کاملاً مغروق در سیال غیرلزج صفر است، اما برای سیال لزج وجود دارد که به دلیل وجود لایه مرزی و بازیافت فشار در انتهای بدنه به وجود می‌آید، این مقدار برای یک جسم با ضریب ظرافت[11] بالا بسیار کوچک است.

عدد رینولدز طبق رابطه (15) بر مبنای سرعت، V، طول کل، L_{T}، و لزجت دینامیکی آب دریا $(\nu = 1.56 \times 10^{-6})$ محاسبه می‌گردد.

$$\mathrm{Re} = \frac{V \times L_{\mathrm{T}}}{\nu} \tag{15}$$

با توجه به محدوده سرعت و طول وسیله در این پژوهش همواره شرایط لایه مرزی مغشوش حاکم بوده و ضریب اصطکاک پوسته طبق رابطه (16) محاسبه می‌گردد.

$$C_{\mathrm{f}} = \frac{0.075}{(\log(\mathrm{Re}) - 2)^2} \tag{16}$$

حال می‌توان ضریب پسای بدنه را براساس ضریب اصطکاک پوسته طبق رابطه (17) محاسبه نمود.

$$C_{\mathrm{f}}^{\mathrm{b}} = C_{\mathrm{f}} \times \left[1 + 60\left(\frac{D}{L_{\mathrm{T}}}\right)^3 + 0.0025\left(\frac{L_{\mathrm{T}}}{D}\right)\right] \times \frac{4S_{\mathrm{wb}}}{\pi D^2} \tag{17}$$

در رابطه (17)، D حداکثر قطر وسیله و S_{wb} مساحت سطح خیس شده بدنه است. عبارت $0.0025(L_{\mathrm{T}}/D)$ مقدار پسای فشاری را نشان می‌دهد. ضریب پسای پایه[12] طبق رابطه (18) محاسبه می‌گردد.

$$CD_{\mathrm{b}} = \frac{0.029}{\sqrt{(C_{\mathrm{f}})_{\mathrm{b}}}} \times \left(\frac{D_{\mathrm{b}}}{D}\right)^3 \tag{18}$$

در رابطه (18)، D_{b} قطر پایه (قطر قسمت عقبه وسیله است). برای بالک‌های وسیله که در انتهای آن قرار دارد ضریب درگ طبق رابطه (19) محاسبه می‌گردد.

$$C_{\mathrm{D0}}{}^{\mathrm{f}} = C_{\mathrm{f}} \times \left[1 + \mathrm{L_c}\left(\frac{t}{c}\right) + 100\left(\frac{t}{c}\right)^4\right] \times \mathrm{R_{LS}} \times \frac{S_{\mathrm{wf}}}{L_{\mathrm{T}}^2} \tag{19}$$

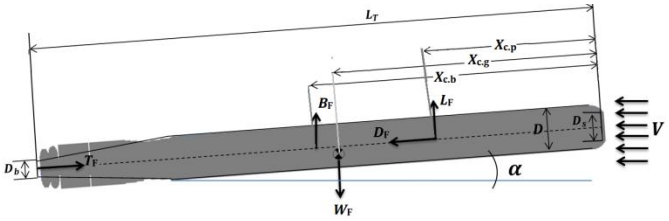

Fig. 2 Body and fins of AUV and free diagram of forces

شکل 2 بدنه و بالک‌های وسیله زیرسطحی و دیاگرام آزاد نیروها

[1] Passive sonar
[2] Beam Width (BW)
[3] Directivity Index (DI)
[4] Source Level (SL)
[5] Noise Level (NL)
[6] Detection Threshold (SL)
[7] Drag Force
[8] Lift Force
[9] Wetted Area
[10] Frontal Area
[11] Fineness Ratio
[12] Base Drag

Archive of SID

www.SID.ir

در رابطه (19)، (t/c) نسبت ضخامت بالک[1]، S_{wf} مساحت خیس شده بالک، $\mathrm{L_c}$ ضریب محل ضخامت بالک و R_{LS} ضریب تصحیح برآی بالک است.

در نهایت ضریب درگ مجموع بدنه و بالک‌های کنترلی در برآی صفر طبق رابطه (20) محاسبه می‌گردد.

$$C_{D0} = \left[{C_{D0}}^{\mathrm{f}} + {C_{\mathrm{f}}}^{\mathrm{b}} \times \frac{\pi D^2}{4L_{\mathrm{T}}^2}\right] \times \mathrm{R_{FB}} + CD_{\mathrm{b}} \times \frac{\pi D^2}{4L_{\mathrm{T}}^2} \quad (20)$$

در رابطه (20) $\mathrm{R_{FB}}$ ضریب تصحیح تداخل بدنه و بالک است.

4-2-2- ضریب برآ

شیب منحنی برآی بدنه، بالک‌ها و ترکیب بدنه و بالک‌ها در روابط (21-23) محاسبه می‌گردد [22,21].

$${C_{\mathrm{L}\alpha}}^{\mathrm{b}} = \frac{2 \times (K_2 - K_1) \times S_0}{L_{\mathrm{T}}^2} \quad (21)$$

در رابطه (21)، $K_2 - K_1$ ضریب جرم ظاهری[2] و S_0 مساحت سطح مقطع وسیله و به صورت رابطه (22) است.

$${C_{\mathrm{L}\alpha}}^{\mathrm{f}} = \frac{S_{\mathrm{e}}}{L_{\mathrm{T}}^2} \times \frac{2\pi \times \kappa \times \mathrm{AR}}{2\kappa + \sqrt{\frac{\mathrm{AR}^2}{\cos^4(\frac{\Lambda_c}{4})} + 4}} \quad (22)$$

در رابطه (22) S_{e} مساحت بالک، κ ضریب تصحیح شیب برآی بالک، AR نسبت منظری بالک و $\Lambda_{c/4}$ مقدار زاویه پیمایش بالک در یک چهارم وتر بالک است. رابطه (23) شیب برآ کل را نشان می‌دهد.

$$C_{\mathrm{L}\alpha} = {C_{\mathrm{L}\alpha}}^{\mathrm{b}} + (K_{\mathrm{fb}} + K_{\mathrm{bf}}) \times {C_{\mathrm{L}\alpha}}^{\mathrm{f}} \quad (23)$$

در رابطه(23) K_{fb} و K_{bf} به ترتیب ضریب برآی بالک در حضور بدنه و ضریب برآی بدنه در حضور بالک است.

با توجه میزان زاویه حمله، α، ضریب پسا و برآ طبق روابط (24) استخراج می‌گردد.

$$C_{\mathrm{L}} = C_{\mathrm{L}\alpha} \times \alpha \quad (24\text{-a})$$

$$C_{\mathrm{D}} = C_{\mathrm{D0}} + \frac{{C_{\mathrm{L}}}^2}{\pi \times \mathrm{AR} \times \mathrm{e}} \quad (24\text{-b})$$

که در رابطه (24-b)، $\mathrm{e} = 0.87$ در نظر گرفته می‌شود. نیروهای نشان داده شده در شکل 2 طبق مجموعه روابط (25) استخراج می‌شود.

$$D_{\mathrm{F}} = 0.5 \times \rho \times V^2 \times {L_{\mathrm{T}}}^2 \times C_{\mathrm{D}} \quad (25\text{-a})$$

$$L_{\mathrm{F}} = 0.5 \times \rho \times V^2 \times {L_{\mathrm{T}}}^2 \times C_{\mathrm{L}} \quad (25\text{-b})$$

$$W_{\mathrm{F}} = m_{\mathrm{T}} \times \mathrm{g} \quad (25\text{-c})$$

$$B_{\mathrm{F}} = \rho \times Vol_{\mathrm{T}} \times \mathrm{g} \quad (25\text{-d})$$

در مجموعه روابط(25)، D_{F}، L_{F}، W_{F} و B_{F} به ترتیب نیروی پسا، نیروی برآ، نیروی وزن و نیروی شناوری، $\rho = 1025\ \mathrm{Kg/m^3}$ چگالی آب دریا، g شدت جاذبه زمین، m_{T} و Vol_{T} به ترتیب جرم و حجم کل وسیله را نشان می‌دهد. در نهایت معادلات تعادل طولی وسیله با توجه به شکل 2 طبق روابط (26) استخراج می‌گردد.

$$(T_{\mathrm{F}} - D_{\mathrm{F}} \times \cos(\alpha)) - (L_{\mathrm{F}} + B_{\mathrm{F}} - W_{\mathrm{F}}) \times \sin(\alpha) \quad (26\text{-a})$$

$$D_{\mathrm{F}} \times \sin(\alpha) + (L_{\mathrm{F}} + B_{\mathrm{F}} - W_{\mathrm{F}})\cos(\alpha) \quad (26\text{-b})$$

در روابط (26)، T_{F} نیروی پیشران این وسیله است. معادله گشتاور پیچ به صورت یک قید روی فاصله بین مرکز جرم و مرکز حجم لحاظ می‌شود که در کل تابعی از زاویه حمله است و در نهایت به قیود مسأله اضافه می‌گردد.

4-3- هندسه، سازه و سایزینگ

بخش‌های مختلف وسیله زیر سطحی در شکل 3 نمایش داده شده است. قسمت دماغه به صورت تخت با قطر آرایه سونار در نظر گرفته شده که با یک منحنی هموار به حداکثر قطر بدنه متصل می‌شود. قسمت عقبه وسیله نیز به شکل مخروط ناقص با طول قسمت عقبه که از حداکثر قطر بدنه شروع و به قطر پایه منتهی می‌گردد.

فرم خارجی بدنه این وسیله را می‌توان به صورت شعاع (r) در موقعیت‌های طولی (l) در امتداد خط مرکزی وسیله نمایش داد ($\mathrm{r(l)} : 0 \leq \mathrm{l} \leq \mathrm{L_T}$). طول کل وسیله با توجه به شکل 3 طبق رابطه (27) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{L_T} = \mathrm{L_e} + \mathrm{L_p} + \mathrm{L_b} + \mathrm{L_m} + \mathrm{L_a} \quad (27)$$

سازه وسیله باید فشار هیدرواستاتیک ناشی از قرارگیری وسیله در بیشینه عمق عملیاتی، $\mathrm{Depth_{max}}$، را تحمل کرده و سازه فروپاشی نکند. ضخامت پوسته خارجی، $\mathrm{t_{sh}}$، این وسیله با استفاده از تئوری مخازن تحت فشار طبق رابطه(28) تعیین می‌شود.

$$\mathrm{t_{sh}} = \mathrm{N_{S.F}}\left(\frac{\rho \times \mathrm{g} \times \mathrm{Depth_{max}} \times \mathrm{r_{max}}}{\sigma_{\mathrm{sh}}}\right) \quad (28)$$

در رابطه فوق $\mathrm{r_{max}}$ حداکثر شعاع وسیله، σ_{sh} حداکثر تنش تسلیم پوسته (پوسته از جنس آلومینیوم $\sigma_{\mathrm{sh}} = 20 \times 10^6\ \mathrm{MPa}$ و $\mathrm{N_{S.F}}$ ضریب اطمینان (در این پژوهش $\mathrm{N_{S.F}} = 2$) در نظر گرفته می‌شود.

با تعیین ضخامت پوسته، قطر داخلی پوسته $\mathrm{r_i(l)}$ در هر موقعیت طولی طبق رابطه (29) محاسبه می‌شود.

$$r_i(l) = r(l) - t_{\mathrm{sh}} \quad (29)$$

جرم پوسته m_{sh}، طبق رابطه (30) محاسبه می‌شود.

$$m_{\mathrm{sh}} = \rho_{\mathrm{sh}}\pi \int_0^{L_{\mathrm{T}}} (r(l)^2 - r_i(l)^2)\, dl \quad (30)$$

در رابطه (30) $\rho_{\mathrm{sh}} = 2.71 \times 10^3 \mathrm{Kg/m^3}$ چگالی آلومینیوم است. مساحت سطح خیس شده طبق رابطه (31) محاسبه می‌شود.

$$S_{\mathrm{b}} = 2\pi \int_0^{L_{\mathrm{T}}} r(l)\, dl \quad (31)$$

حجم کل و مرکز حجم وسیله طبق روابط (32) محاسبه می‌شود.

$$Vol_{\mathrm{T}} = \pi \int_0^{L_{\mathrm{T}}} r(l)^2\, dl \quad (32\text{-a})$$

$$X_{\mathrm{c.b}} = \frac{\int_0^{L_{\mathrm{T}}} l \times r(l)^2\, dl}{\int_0^{L_{\mathrm{T}}} r(l)^2\, dl} \quad (32\text{-b})$$

و در نهایت جرم کل و مرکز جرم وسیله طبق روابط (33)محاسبه می‌گردد.

$$m_{\mathrm{T}} = m_{\mathrm{sh}} + m_{\mathrm{e}} + m_{\mathrm{p}} + m_{\mathrm{b}} + m_{\mathrm{m}} + m_{\mathrm{a}} \quad (33\text{-a})$$

$$X_{\mathrm{c.g}} = \frac{1}{m_{\mathrm{T}}} \times \{X_{\mathrm{sh}} \times m_{\mathrm{sh}} + X_{\mathrm{e}} \times m_{\mathrm{e}} + X_{\mathrm{p}} \times m_{\mathrm{p}} + X_{\mathrm{b}} \times m_{\mathrm{b}} + X_{\mathrm{m}} \times m_{\mathrm{m}} + X_{\mathrm{a}} \times m_{\mathrm{a}}\} \quad (33\text{-b})$$

در روابط (33)، $\mathrm{m_{sh}}$ جرم پوسته، $\mathrm{m_e}$ جرم بخش الکترونیک، $\mathrm{m_p}$ جرم محموله، $\mathrm{m_b}$ جرم بخش باتری، $\mathrm{m_m}$ جرم بخش موتور و $\mathrm{m_a}$ جرم بخش عقبه است.

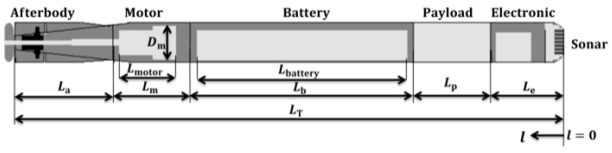

Fig. 3 All section of AUV with length of each section

شکل 3 تمام بخش‌های وسیله به همراه طول هر قسمت

[1] Fin thickness ratio
[2] Apparent mass factor

Archive of SID

www.SID.ir

4-4- توان و رانش

توان مورد نیاز موتور وسیله با توجه به نیروی تراست، سرعت پیشروی، عملکرد پروانه (η_p) و عملکرد شافت (η_{sh}) طبق رابطه (34) محاسبه می‌شود.

$$Pow_m = \frac{T_F \times V}{\eta_{sh} \times \eta_p} \quad (34)$$

طول موتور وسیله با توجه به رابطه (35) محاسبه می‌گردد. در رابطه (35)، Pow_m توان موتور، N سرعت چرخش پروانه، c_a ضریب توان موتور و D_m قطر موتور است.

$$L_{motor} = \frac{Pow_m}{c_a \times N \times {D_m}^2} \times 10^{-3} \quad (35)$$

توان مصرفی سونار را با توجه به پهنای پرتو، شاخص آشکارپذیری و ضریب توان سونار، β، می‌توان طبق رابطه (36) تخمین زد.

$$Pow_s = \beta \times BW \times 10^{\left(\frac{DI}{20}\right)} \quad (36)$$

توان مصارف داخلی وسیله، که شامل توان سونار و توان بخش الکترونیک است طبق رابطه(37) محاسبه می‌گردد.

$$Pow_h = Pow_e + Pow_s \quad (37)$$

در نهایت توان کل طبق رابطه (38) محاسبه می‌شود که η_m در این رابطه عملکرد موتور است.

$$Pow = Pow_h + \frac{Pow_m}{\eta_m} \quad (38)$$

منبع تأمین انرژی این وسیله به صورت باتری الکترکی با چگالی انرژی مشخص در نظر گرفته می‌شود. چگالی انرژی اغلب به صورت انرژی بر واحد وزن باتری بیان می‌گردد که با توجه به متناسب بودن وزن با طول باتری، می‌توان انرژی بر واحد طول $(e_L\ (J/m))$را به عنوان چگالی انرژی باتری در نظر گرفت. در این صورت انرژی ذخیره شده در باتری با طول L_b طبق رابطه (39) محاسبه می‌شود.

$$E = L_b \times e_L \quad (39)$$

4-5- تاکتیک (عملکرد تاکتیکی وسیله)

هدف نهایی از طراحی یک وسیله زیر سطحی انجام مأموریت مشخص در محیط عملیاتی است. پارامترهای تاکتیکی که به وسیله آن سناریوی انجام ماموریت (تاکتیک به کارگیری وسیله در محیط عملیات) تعریف می‌گردد در این پژوهش شامل برد، زمان انجام عملیات (مداومت پروازی)، زمان رسیدن به هدف و احتمال کشف هدف در نظر گرفته شده است.

با توجه به توان کل و انرژی ذخیره شده در باتری می‌توان برد و حداکثر زمان انجام ماموریت وسیله را به ترتیب طبق روابط (41,40) محاسبه نمود.

$$Rng = \frac{E \times V}{Pow} \quad (40)$$

$$T_T = \frac{Rng}{V} = \frac{E}{Pow} \quad (41)$$

برای محاسبه احتمال آشکارسازی (کشف) هدف فرض‌های ساده‌کننده زیر در نظر گرفته می‌شود.

1- موقعیت اولیه وسیله تا هدف D_0 تخمین زده می‌شود. عدم قطعیت در تخمین به صورت یک ناحیه دایره‌ای با شعاع R_0 در نظر گرفته می‌شود (شکل a-4).

2- سرعت هدف مقدار V_{tar} است، اما جهت حرکت هدف آن در طول مسیر حرکت وسیله به سمت هدف مشخص نیست.

3- وسیله به صورت مستقیم به سمت هدف حرکت می‌کند.

با توجه به دو شرط (1) و (2) ناحیه عدم قطعیت حضور هدف به صورت دایره‌ای است که دارای شعاع اولیه R_0 بوده و این شعاع با سرعت V_{tar} طبق شکل b-4 در حال رشد است.

بنابراین ناحیه حضور هدف (مساحت ناحیه عدم قطعیت در تشخیص هدف) در طول زمان را می‌توان طبق رابطه (42) محاسبه کرد.

$$A_{Uncertainty} = \pi \times \left(R_0 + V_{tar}(T_{det} + t)\right)^2 \quad (42)$$

در رابطه (42) T_{det} زمان تشخیص هدف است که با توجه به موقعیت اولیه وسیله تا هدف، برد سونار و سرعت وسیله و سرعت هدف طبق رابطه (43) محاسبه می‌گردد.

$$T_{det} = \frac{D_0 - DR}{V + V_{tar}} \quad (43)$$

ناحیه‌ای که توسط وسیله در هر لحظه جهت تشخیص هدف جستجو و طبق رابط (44) محاسبه می‌گردد (شکل c-4).

$$A_{Search} = DR \times BW \times V \times t \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (44)$$

احتمال کشف هدف را به صورت نسبت مساحت جستجوی هدف به مساحت ناحیه حضور هدف (مساحت ناحیه عدم قطعیت در تشخیص هدف) را می‌توان طبق رابطه (45) محاسبه کرد.

$$P_{det} = \frac{A_{Search}}{A_{Uncertainty}} = \frac{DR \times BW \times V \times T_{max}}{180 \times \left(R_0 + V_{tar}(T_{det} + T_{max})\right)^2} \quad (45)$$

در رابطه فوق T_{max} زمان رسیدن به حداکثر احتمال کشف است که طبق رابطه (46) محاسبه می‌گردد.

$$T_{max} = \min(T_T - T_{det}, \frac{R_0}{V_{tar}} + T_{det}) \quad (46)$$

5- پیاده‌سازی

مدل‌سازی موضوعات توصیف شده در بخش 4 که به عنوان روابط طراحی مفهومی یک وسیله زیر سطحی برای پنج موضوع سونار، هیدرودینامیک، سازه، رانش و تاکتیک در نظر گرفته شده در ساختار پیشنهادی امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی پیاده‌سازی گردیده است. متغیرهای طراحی (x_i) و متغیرهای خروجی (y_i) که در توصیف مدل موضوعات مورد استفاده قرار گرفته در جدول 2 خلاصه شده است.

با استفاده از معماری امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی مسأله بهینه‌سازی تنها به سه متغیر مستقل طراحی (x_i) شامل سرعت وسیله، پهنای پرتو افقی سونار و طول باتری است. این متغیرهای سه متغیر طراحی مشترک نیز هستند (در بیش از یک موضوع به عنوان متغیر طراحی ظاهر می‌شوند). دیگر متغیرها (y_i) به عنوان متغیرهای حالت و متغیرهای خروجی در هر موضوع در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر موضوعات جهت محاسبه این متغیرها (حالت و خروجی) باید پیش از هر تکرار بهینه‌سازی از

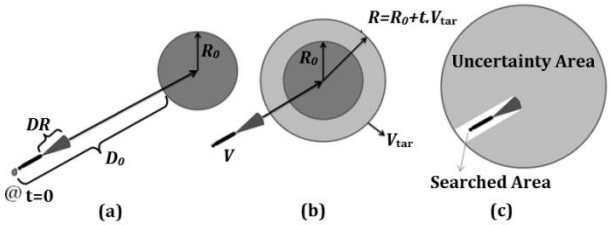

Fig. 4 The area of uncertainty and the searched area: a- At the launch time, b- Approaching to the target, c- Searching the target

شکل 4 مساحت ناحیه عدم قطعیت تشخیص هدف و ناحیه جستجوی هدف: الف- در لحظه شلیک، ب- هنگام نزدیک شدن به هدف، ج- هنگام جستجو

Archive of SID

www.SID.ir

طریق تحلیل موضوعات انجام گردد. ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی برای موضوعات وسیله زیرسطحی توصیف شده در شکل 5 نمایش داده شده است.

برای دستیابی به نتایج عددی، ساختار معماری امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بر دو متغیر طراحی طرح‌ریزی شده است. این دو حالت ویژه با لحاظ کردن عدم قطعیت بر دو متغیر طراحی سرعت وسیله و پهنای پرتو افقی سونار انجام شده که جزئیات آن در جدول 3 نمایش داده شده است، همچنین فرض شده که متغیرهای طراحی غیرقطعی به صورت مستقل از یکدیگر رفتار نموده و توزیع حاکم بر تمام عدم قطعیت ها به صورت توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود.

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که اثر بخشی یک وسیله زیر سطحی را نشان می‌دهد، احتمال کشف هدف توسط این وسیله P_{det} است که در موضوع تاکتیک مدل‌سازی شده و عددی بین 0 و 1 است. در این پژوهش مقدار میانگین (امید ریاضی) احتمال کشف هدف ($\mu_{P_{\mathrm{det}}}$) به عنوان مقدار نامی اثر بخشی و انحراف معیار احتمال کشف هدف ($\sigma_{P_{\mathrm{det}}}$) به عنوان پارامتری که میزان حساسیت اثربخشی را نشان می‌دهد جهت تعریف تابع هزینه دو هدفه مورد استفاده قرارد گرفته است. کاربرد انحراف معیار به عنوان یک تابع هدف منجر به پیکره‌بندی طراحی مقاوم خواهد شد. در این پیکره‌بندی حساسیت متغیرها و پارامترهای طراحی نسبت به عدم قطعیت حداقل می‌گردد. با توجه به تعریف این دو پارامتر بیشترین مقدار میانگین احتمال کشف هدف و کمترین انحراف معیار احتمال کشف هدف نسبت به عدم قطعیت در متغیرهای طراحی مطلوب است. به سادگی می‌توان مسأله حداکثرسازی را با یک علامت منفی به مسأله مینیمم‌سازی تبدیل کرد. از این‌رو بهینه‌سازی توابع هدف بر مبنای مینیمم‌سازی هر دو پارامتر به صورت $\min\left(-\mu_{P_{\mathrm{det}}}, \sigma_{P_{\mathrm{det}}}\right)$ در نظر گرفته می‌شود.

جرم کل نرمال شده، $m_{\mathrm{T}}/m_{\mathrm{T_{max}}}$، نسبت زمان کشف هدف به زمان کل، $T_{\mathrm{det}}/T_{\mathrm{T}}$، و مقادیر حد پایین و بالای برخی از متغیرهای طراحی از قبیل طول کل، زاویه حمله، طول باتری، طول موتور، قطر دماغه سونار و پهنای پرتو سونار به عنوان قیود نامساوی طراحی در نظر گرفته می‌شود که در معادله (47) خلاصه شده است. با تعریف توابع هدف و قیود می‌توان مسأله بهینه‌سازی چند هدفه مقید را فرمول‌بندی کرد:

$$
\begin{aligned}
&\min \quad f_1 = -\mu_{P_{\mathrm{det}}} \\
&\min \quad f_2 = \sigma_{P_{\mathrm{det}}} \\
&\mathrm{S.t} \quad g_1 = \left(\frac{m_{\mathrm{T}}}{m_{\mathrm{T_{max}}}} - 1\right) \le 0 \\
&\qquad g_2 = \left(\frac{T_{\mathrm{det}}}{T_{\mathrm{T}}} - 0.8\right) \le 0 \\
&\qquad g_3 = L_{\mathrm{T}} - 8 \le 0 \\
&\qquad g_4 = \alpha - 7 \le 0 \\
&\qquad g_5 = -7 - \alpha \le 0 \\
&\qquad g_6 = L_{\mathrm{b}} - 5 \le 0 \\
&\qquad g_7 = -1 - L_{\mathrm{b}} \le 0 \\
&\qquad g_8 = L_{\mathrm{m}} - 1 \le 0 \\
&\qquad g_9 = 0.3 - L_{\mathrm{m}} \le 0 \\
&\qquad g_{10} = D_{\mathrm{s}} - 0.85\,D \le 0 \\
&\qquad g_{11} = 0.15 - D_{\mathrm{s}} \le 0 \\
&\qquad g_{12} = BW_{\mathrm{h}} - 120 \le 0 \\
&\qquad g_{13} = 10 - BW_{\mathrm{h}} \le 0
\end{aligned}
\tag{47}
$$

تمامی قیود در مسأله بهینه‌سازی (47) به صورت نامساوی است، از این‌رو تابع جریمه طبق معادله (48) تعیین می‌گردد.

$$Pn = r_I \times \sum_{k=1}^{m} (\max(g_k(x), 0))^2 \tag{48}$$

در این مقاله فاکتور جریمه r_I مقداری ثابت در نظر گرفته شده است. تابع جریمه تعریف شده در معادله (48) به توابع هدف معادله (47) افزوده شده و تابع هدف افزوده نهایی طبق رابطه (49) به دست می‌آید.

$$F_1 = -\mu_{P_{\mathrm{det}}} + Pn \tag{49-a}$$
$$F_2 = \sigma_{P_{\mathrm{det}}} + Pn \tag{49-b}$$

هر یک از دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات چند هدفه و الگوریتم ژنتیک با طبقه‌بندی حل‌های غیرغالب (از این به بعد با عنوان الگوریتم ژنتیک چند هدفه بیان می‌شود) را می‌توان با ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی ترکیب و چارچوب جدید بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی مقاوم پیشنهادی را ساختاردهی کرد. پارامترهای این ساختار پیشنهادی در جدول 4 خلاصه شده است.

6- نتایج

چارچوب پیشنهادی بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی مقاوم برای دو نمونه

جدول 2 متغیرهای طراحی استفاده شده در مدل‌سازی موضوعات

Table 2 The design variables that are used in disciplines modeling

موضوعات	علامت	نوع متغییر
متغیرهای مشترک	$V, L_{\mathrm{b}}, BW_{\mathrm{h}}$	$x_1 \sim x_3$
سونار	DI, DR, D_{s}	$y_1 \sim y_3$
هیدرودینامیک	$D_{\mathrm{F}}, L_{\mathrm{F}}\ , \alpha\ , T_{\mathrm{F}}$	$y_4 \sim y_7$
توان/ پیشرانش	$Pow, L_{\mathrm{m}}\ , E$	$y_8 \sim y_{10}$
سازه و چیدمان	$L_{\mathrm{T}}, S_{\mathrm{b}}, m_{\mathrm{T}}\ , Vol_{\mathrm{T}}$	$y_{11} \sim y_{14}$
تاکتیک	$Rng, T_{\mathrm{T}}, T_{\mathrm{det}}\ , P_{\mathrm{det}}$	$y_{15} \sim y_{18}$

جدول 3 متغیرهای تحت عدم قطعیت

Table 3 The design variables under uncertainty

متغیر تحت عدم قطعیت	سرعت	پهنای پرتو افقی سونار
علامت	V	BW
واحد	m/s	Deg
محدوده پایین	5	50
محدوده بالا	10	120
مقدار میانگین	μ_{x_1}	μ_{x_2}
مقدار انحراف معیار	σ_{x_1}=5	σ_{x_1}=20

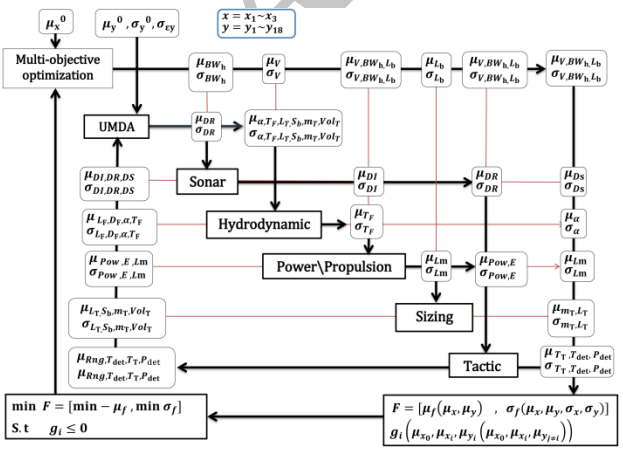

Fig. 5 Structure of UMDF framework for the AUV disciplines

شکل 5 ساختار امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی برای موضوعات وسیله زیر سطحی

Archive of SID

www.SID.ir

جدول 4 پارامترهای ساختار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه و الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه در ترکیب با روش امکان‌پذیری چند موضوعی غیرقطعی

Table 4 The parameters of NSGA-II and MOPSO framework integrated by UMDF

نوع الگوریتم	پارامتر	مقدار
الگوریتم ژنتیک چند هدفه	حداکثر تعداد تکرار	200
	اندازه جمعیت	50
	تعداد نسل	30
	درصد ادغام	0.7
	درصد جهش	0.4
	نرخ جهش	0.02
	حداکثر تعداد تکرار	200
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه	اندازه گروه ذرات (تعداد ذرات)	100
	اندازه مخزن	50
	ضریب اینرسی	0.5
	ضریب فردی	1
	ضریب اجتماعی	2
	تعداد شبکه	5
	ضریب اعمال فشار جهت انتخاب رهبر	2
	ضریب اعمال فشار جهت حذف	2
امکان‌پذیری چند موضوعی قطعی	خطای نسبی قابل قبول جهت همگرایی	0.01
	فاکتور جریمه ثابت	5

مسأله پیاده‌سازی شده است که پیشتر در جدول 3 خلاصه شده بود. دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه با توابع هدف و فاکتور جریمه یکسان به کار برده می‌شود.

شکل 6 به نمایش طرح‌های بهینه پارتو به دست آمده از حل دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای مسأله عدم قطعیت در سرعت پرداخته و مقایسه نتایج بین طرح‌ها نیز نمایش داده شده است.

طبق نتایج طرح‌های بهینه- پارتو در شکل 6 دو الگوریتم ازدحام ذارت چند هدفه و الگوریتم ژنتیک چند هدفه هر دو جبهه- پارتو تقریباً یکسانی را تولید کرده و در سه نوع طرح معرفی شده مقادیر تقریباً مشابهی برای متغیرهای طراحی و توابع هدف به دست آمده است. زمان حل مسأله بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک چند هدفه نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه حدوداً 39% کمتر است (178 دقیقه نسبت به 294 دقیقه). همچنین تعداد توابع فراخوانی در این الگوریتم جهت رسیدن به همگرایی حدود 50% کمتر از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه است (220000 در مقابل 442200) که دلیل آن تعداد جمعیت کمتر الگوریتم ژنتیک چند هدفه است؛ بنابرین با تعداد جمعیت کمتر الگوریتم ژنتیک چند هدفه نتایج یکسانی را در زمان کمتر و با فراخوانی تعداد کمتر توابع ارائه می‌دهد.

از بین تمامی طراحی‌های بهینه پارتو که توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه به دست می‌آید، سه طرح از بین طرح‌های دیگر انتخاب می‌گردد. این طرح‌ها دارای ویژگی‌های زیر هستند.

1- طرح های به دست آمده از ساختار بهینه‌سازی چند موضوعی صرفاً بهینه قطعی[1] با حداکثرسازی مقدار میانگین احتمال کشف هدف به عنوان تابع هزینه.

2- طرح‌های به دست آمده از ساختار بهینه‌سازی چند موضوعی صرفاً مقاوم[2] با حداکثرسازی مقدار انحراف معیار احتمال کشف هدف به عنوان تابع هزینه.

3- طرح‌های به دست آمده از ساختار بهینه‌سازی چند موضوعی تعاملی به صورت تعامل بین طراحی مقاوم و طراحی بهینه[3] با مینیمم‌سازی مجموع مقدار میانگین و انحراف معیار احتمال کشف هدف به عنوان تابع هزینه.

حالت تعاملی بین طراحی بهینه و طراحی مقاوم از طریق مینیمم‌سازی ترکیب خطی $-\mu_{P_{\det}} + \mathrm{k}\,\sigma_{P_{\det}}$ به انجام می‌رسد که k به عنوان سطح مقاوم بودن معرفی می‌گردد (در این مقاله مقدار $\mathrm{k} = 1$ در نظر گرفته شده است).

متغیرهای طراحی به دست آمده از طرح‌های (1-3) با استفاده از دو الگوریتم مبتنی‌بر پارتو در جدول 5 گردآوری شده است.

با توجه به نتایج جدول 5 اگر طراحی در معرض عدم قطعیت در سرعت قرار داشته باشد، آن‌گاه وسایل زیرسطحی با سرعت پایین، برد بلند و سونار با پهنای پرتو باریک مقاوم‌تر از وسایل زیرسطحی با سرعت بالا، برد کوتاه و سونار با پهنای پرتو عریض است.

شکل 7 نمودار تغییرات احتمال کشف هدف را به صورت تابعی از سرعت وسیله برای سه نوع طرح خارج از فرآیند طراحی[4] نمایش می‌دهد.

اگر به نتایج تغییرات احتمال کشف هدف (به عنوان عملکرد سیستم) مشاهده می‌شود نسبت به تغییرات سرعت در شکل 7 دقت کنیم که به ازای یک تغییر در مقدار نامی سرعت (6 m/s) اگر طراحی در ساختار بهینه‌سازی صرفاً مقاوم انجام گردد، کمترین تغییرات در عملکرد سیستم (حدود 4%) نسبت به دیگر ساختارها وجود خواهد داشت، حال آن‌که اگر ساختار طراحی در قالب ساختار طراحی صرفاً بهینه انجام گردد این تغییرات بیشترین مقدار (حدود 33%) را درپی خواهد داشت. حالت تعاملی عددی بین این دو مقدار است؛ بنابراین ما نشان دادیم که تغییرات عملکرد سیستم در حالت طراحی صرفاً مقاوم کاهش قابل توجهی نسبت به حالت طراحی صرفاً بهینه دارد. باید توجه کرد که در طراحی صرفاً مقاوم مقدار عملکرد سیستم نیز به شدت کاهش می‌یابد، از این‌رو با انتخاب سطح مقاوم‌سازی طراحی (پارامتر k) می‌توان تعامل مناسبی بین مقدار عملکرد به عنوان شاخص بهینگی و تغییرات عملکر به عنوان شاخص مقاوم بودن برقرار کرد.

شکل 8 به نمایش طرح‌های بهینه پارتو به دست آمده از حل دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای مسأله عدم قطعیت در پهنای پرتو سونار پرداخته است. نتایج حاصل نیز در جدول 6 گردآوری شده است.

اگر به نتایج تغییرات احتمال کشف هدف نسبت به تغییرات پهنای پرتو سونار دقت کنیم که در شکل 9 نمایش داده شده است مشاهده می‌شود که به ازای یک تغییر در مقدار نامی پهنای پرتو سونار معادل 20 درجه اگر طراحی در ساختار بهینه‌سازی صرفاً مقاوم انجام گردد، کمترین تغییرات در عملکرد سیستم (حدود 3%) نسبت به دیگر ساختارها وجود خواهد داشت، حال آن‌که اگر ساختار طراحی در قالب ساختار طراحی صرفاً بهینه انجام گردد این تغییرات بیشترین مقدار (حدود 14%) را درپی خواهد داشت. حالت تعاملی عددی بین این دو مقدار است؛ بنابر این باز خواهیم دید که

[1] Deterministic MDO (DMDO)

[2] Robust MDO(RMDO)
[3] Compromise MDO (CMDO)
[4] Off-design

www.SID.ir
Archive of SID

تغییرات عملکرد سیستم در حالت طراحی صرفاً مقاوم کاهش قابل توجهی نسبت به حالت طراحی صرفاً بهینه دارد.

با توجه به نتایج جدول 6 اگر طراحی در معرض عدم قطعیت در پهنای بیم سونار قرار داشته باشد، آن‌گاه وسایل زیر سطحی با سرعت بالا، برد کوتاه و سونار با پهنای پرتو عریض مقاوم‌تر از وسایل زیرسطحی با سرعت پایین، برد بلند و سونار با پهنای بیم باریک است.

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این مقاله نشان می‌دهد تغییرات عملکرد سیستم در حالت طراحی چند موضوعی صرفاً مقاوم کاهش قابل توجهی نسبت به حالت طراحی چند موضوعی صرفاً بهینه دارد. این در حالی است که در طراحی چند موضوعی صرفاً مقاوم مقدار عملکرد سیستم نیز به شدت کاهش می‌یابد، از این‌رو با انتخاب سطح مقاوم‌سازی طراحی می‌توان تعامل مناسبی بین مقدار عملکرد به عنوان شاخص بهینگی و تغییرات عملکر به عنوان شاخص مقاوم بودن برقرار کرد. رویکرد بهینه‌سازی در این ساختار به صورت چند هدفه بوده که

جدول 5 متغیرهای طراحی استخراج شده از جبهه پارتو برای مسأله عدم قطعیت در سرعت

Table 5 The design parameters from Pareto-frontier for speed uncertainty problem

نوع بهینه‌ساز چند هدفه	متغیر طراحی	صرفاً بهینه	تعاملی	صرفاً مقاوم
	V	16.37	16.38	12.58
	BW	121	97	10
	L_{b}	2.53	2.80	4.03
	Rng	10661	11403	22578
الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II	L_{T}	6.22	6.51	7.65
	m_{T}	1756	1836	2161
	L_{m}	0.40	0.41	0.32
	T_{det}	237	234	257
	$-\mu_{P_{\mathrm{det}}}$	-0.49	-0.46	-0.07
	$\sigma_{P_{\mathrm{det}}}$	0.23	0.17	0.03
	V	16.28	16.14	12.58
	BW	120	98	10
	L_{b}	2.58	2.75	3.37
	Rng	10900	11618	20132
الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه MOPSO	L_{T}	6.27	6.44	6.98
	m_{T}	1771	1818	1973
	L_{m}	0.39	0.40	0.31
	T_{det}	238	238	257
	$-\mu_{P_{\mathrm{det}}}$	-0.49	-0.46	-0.07
	$\sigma_{P_{\mathrm{det}}}$	0.23	0.17	0.03

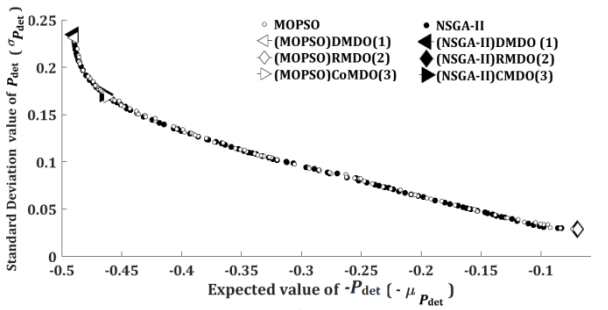

Fig. 6 Pareto optimal solutions for speed uncertainty problem by MOPSO and NSGA-II for (1) DMDO (2) RMDO (3) CMDO

شکل 6 طرح‌های بهینه پارتو برای مسأله عدم قطعیت در سرعت با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام ذرات چند هدفه و الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای سه ساختار صرفاً مقاوم، صرفاً بهینه و تعاملی

جدول 6 پارامترهای طراحی استخراج شده از جبهه پارتو برای مسأله عدم قطعیت در پهنای پرتو سونار

Table 6 The design parameters from Pareto-frontier for beam width uncertainty problem

نوع بهینه‌ساز چند هدفه	متغیر طراحی	صرفاً بهینه	تعاملی	صرفاً مقاوم
	V	16.16	15.80	14.56
	BW	123	115	131
	L_{b}	2.49	2.29	0.97
	Rng	10834	10588	4823
الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II	L_{T}	6.18	5.96	4.58
	m_{T}	1744	1683	1297
	L_{m}	0.39	0.37	0.30
	T_{det}	240	244	264
	$-\mu_{P_{\mathrm{det}}}$	-0.49	-0.48	-0.15
	$\sigma_{P_{\mathrm{det}}}$	0.08	0.05	0.01
	V	16.38	15.61	14.25
	BW	121	116	132
	L_{b}	2.53	2.27	0.95
	Rng	10660	10755	4816
الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه MOPSO	L_{T}	6.22	5.93	4.55
	m_{T}	1757	1677	1289
	L_{m}	0.40	0.36	0.30
	T_{det}	237	247	269
	$-\mu_{P_{\mathrm{det}}}$	-0.49	-0.48	-0.15
	$\sigma_{P_{\mathrm{det}}}$	0.08	0.05	0.01

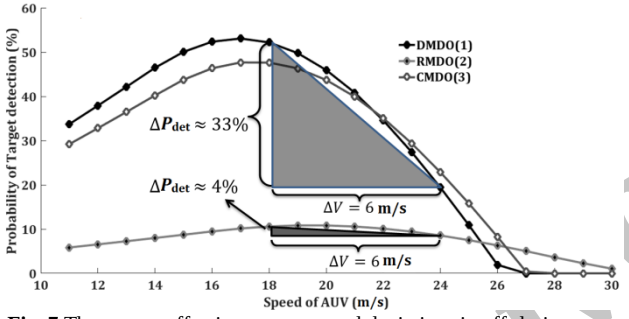

Fig. 7 The system effectiveness vs. speed deviations in off-design state

شکل 7 عملکرد سیستم در مقابل تغییرات سرعت خارج از فرآیند طراحی

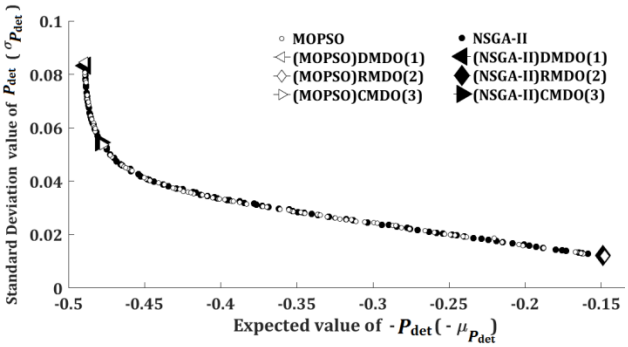

Fig. 8 Pareto optimal solutions for sonar beam width uncertainty problem by MOPSO and NSGA-II for (1) DMDO (2) RMDO (3) CMDO

شکل 8 طرح‌های بهینه پارتو برای مسأله عدم قطعیت در پهنای پرتو سونار با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام ذرات چند هدفه و الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای سه ساختار صرفاً مقاوم، صرفاً بهینه و تعاملی

جهت استخراج طرح‌های بهینه مقاوم از دو روش بهینه‌سازی مبتنی‌بر پارتو استفاده شد که نتایج تقریباً مشابهی از هر دو روش استخراج گردید. با این وجود زمان حل و تعداد توابع فرخوانی شده در الگوریتم ژنتیک چند هدفه نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه کاهش قابل توجهی دارد.

www.SID.ir

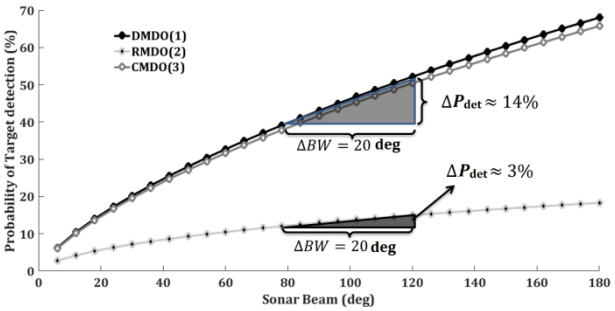

Fig. 9 The system effectiveness vs. sonar beam width deviations in off-design state

شکل 9 عملکرد سیستم در مقابل تغییرات پهنای پرتو خارج از فرآیند طراحی

از آن‌جا که در این مقاله تنها مقاوم‌سازی تابع هدف در نظر گرفته شد و قیود طراحی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ارزیابی گردید، در کارهای آتی، مسأله مقاوم بودن قیود نیز علاوه‌بر مقاوم بودن توابع هدف در نظر گرفته خواهد شد. در ساختار جدید سعی خواهد شد نقطه بهینه طراحی تحت عدم قطعیت همواره در ناحیه امکان‌پذیر قرار گیرد و با این رویکرد گامی مؤثر در جهت دست‌یابی به طراحی وسیله زیر سطحی مبتنی‌بر قابلیت اطمینان برداشته خواهد شد.

8- مراجع

[1] M. Yukish, L. Bennett, T. Simpson, Requirements on MDO imposed by the undersea vehicle conceptual design problem, *Presented at the 8th AIAA Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-2000-4816, Long Beach, CA, U.S.A, 2000.

[2] A. Belegundu, E. Halberg, M. Yukish, T. Simpson, Attribute-based multidisciplinary optimization of undersea vehicles, *Presented at the 8th AIAA/USAF /NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-2000-4865, Long Beach, CA, U.S.A, 2000.

[3] D. M. Charles, W. S. Timothy, H. K. Paul, Y. Mike, Multidisciplinary design optimization testbed based on autonomous underwater vehicle design, *Presented at 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Atlanta, Georgia, 2002.

[4] W. B. Todd, V. G. Ramana, E. R. Matthew, System level optimization of undersea vehicles subject to mission performance, *Presented at the 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, AIAA 2008-6064, Victoria, British Columbia, Canada, 2008.

[5] Y. P. Zhang, J. Y. Zhang, W. J. Ying, Torpedo guidance system multidisciplinary design based on IDF, *IEEE computer society. Presented at the 2013 Fifth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and* Cybernetics, Hangzhou, China, 2013.

[6] W. Luo, W. Lyu, An application of multidisciplinary design optimization to the hydrodynamic performances of underwater robots, *Ocean Engineering*, Vol. 104, No. 12, pp. 686–697, 2015.

[7] G. Taguchi, A. J. Rafanelli, Taguchi on robust technology development: Bringing quality engineering upstream, *Electronic Packaging*, Vol. 11, No. 8, pp. 116-161, 1994.

[8] J. Chen, X. Renbin, Z. Yifang, A response surface based hierarchical approach to multidisciplinary robust optimization design, *Advance Manufacture Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 301–309, 2005.

[9] M. Diez, D. Peri, Robust optimization for ship conceptual design, *Ocean Engineering*, Vol. 37, No. 12, pp. 966–977, 2010.

[10] K. Zaman, S. Mahadevan, Robustness-Based design optimization of multidisciplinary system under epistemic uncertainty, *AIAA*, Vol. 51, No. 5, pp. 1021-1031, 2013.

[11] N. V. Nguyen, T. Maxim, H. Park, S. Kim, J. Lee, A multidisciplinary robust optimization framework for UAV conceptual design, *Aeronautical*, Vol. 118, No. 1200, pp. 123-142, 2014.

[12] C. D. McAllister, *Uncertainty Propagation in Multidisciplinary Design Optimization*, PhD Thesis, the graduate school, the Pennsylvania state university, 2002.

[13] A. Frits, Formulation *of an Integrated Robust Design and Tactics Optimization Process for Undersea Weapon Systems*, PhD Thesis, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004.

[14] A. Khairul, R. Tapabrata, G. A. Sreenatha, A new robust design optimization approach for unmanned underwater vehicle design, *Proc IMechE Part M: Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 226, No. 3, pp. 235–249, 2012.

[15] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: First edition, University of Michigan Press, pp.121-153, 1975.

[16] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

[17] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197, 2002.

[18] M. R. Sierra, C. A. Coello Coello, Multi-Objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art, *Computational Intelligence Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 287–308, 2006.

[19] S. S. Rao, *Engineering Optimization, Theory and Practice*, 4th Edition, pp. 380–491, John Wiley & Sons, 2009.

[20] A. D. Waite, *Sonar for Practicing Engineers*, 3rd Edition, pp. 125-159, John Wiley & sons, LTD, 2002.

[21] E. de Barros, J. Dantas, A. M. Pascoal, E. de Sa, Investigation of normal force and moment coefficients for an AUV at nonlinear angle of attack and sideslip range, *IEEE (Oceanic Engineering)*, Vol. 33, No. 4, pp. 538–549, 2008.

[22] E. de Barros, A. M. Pascoal, E. de Sa, Investigation of a method for predicting AUV erivatives, *Ocean Engineering*, Vol. 35, No. 16, pp. 1627–1636, 2008.

Archive of SID

www.SID.ir