



بهینه‌سازی سیستم کنترل وضعیت با جت عکس‌العملی با استفاده از الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره

نوبهارى، هادى^{۱*}، بندى‌کنارى، حمید^۲، دارابى، داود^۳ و باصحبت نوین‌زاده، علیرضا^۴

۱- استادیار دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، هسته پژوهشی هدایت و کنترل

۲- کارشناس ارشد هوافضا دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی هوافضا

۳- کارشناس ارشد هوافضا دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، هسته پژوهشی هدایت و کنترل

۴- استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۲۹)

چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی سیستم کنترل وضعیت یک وسیله پرنده خاص مورد بررسی قرار گرفته است. پرتاب این وسیله پرنده به‌صورت عمودی است و اندکی پس از پرتاب، توسط یک سیستم کنترل وضعیت از نوع جت عکس‌العملی وضعیت زاویه‌ای آن به وضعیت مورد نیاز تغییر می‌کند. در بخش ابتدایی این مقاله فرآیند طراحی سیستم کنترل وضعیت این وسیله، که شامل طراحی اجزای سیستم کنترل و نیز طراحی حلقه‌های کنترلی می‌باشد، تدوین شده است. بدین منظور پارامترهای هر یک از زیرسیستم‌ها به سه دسته پارامترهای پیش‌فرض، پارامترهای مستقل طراحی و پارامترهای وابسته تقسیم شده‌اند و روابط حاکم بین آنها تدوین شده است. وابستگی موجود بین پارامترهای زیرسیستم‌های مختلف موجب می‌شود که برخی از پارامترهای محاسبه شده در یک زیرسیستم، پارامترهای ورودی زیرسیستم دیگر باشند. به همین دلیل لازم بوده است که ترتیب انجام محاسبات زیرسیستم‌ها نیز تدوین شود. در این وسیله پرنده دستیابی به کمترین زمان چرخش از وضعیت قائم به وضعیت مطلوب ضروری است. زیرا اتمام فاز کنترل وضعیت پیش‌نیاز شروع فاز هدایت وسیله است. از طرفی در طراحی سیستم کنترل وضعیت ملاحظاتی از قبیل دینامیک عملگر وجود دارد که محدودیت‌هایی را در دست‌یابی به این هدف بوجود می‌آورد. به عبارت دیگر باید بین مأموریت خواسته شده برای وسیله پرنده و محدودیت‌های سیستمی مصالحه برقرار شود. به این منظور از رویکرد بهینه‌سازی چندمنظوره برای برآورده کردن همزمان همه اهداف و ارضای همه قیود طراحی استفاده شده است. در این مقاله مسئله طراحی سیستم کنترل وضعیت به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی با ۱۴ پارامتر مجهول طراحی و ۱۳ قید سیستمی مدل شده و از الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره برای حل آن و دستیابی به طرح بهینه‌ای، که با در نظر گرفتن قیود همه اهداف را تا حد مناسبی برآورده می‌کند، استفاده شده است. دستیابی به کمترین زمان برخاست، کمترین درصد فراجش و استفاده از عملگر با کمترین پهنای باند ممکن به‌عنوان اهداف طراحی در نظر گرفته شده‌اند. بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی بر اساس نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی پرواز شش‌درجه‌آزادی غیرخطی و با در نظر گرفتن محدودیت اشباع سیگنال کنترلی انجام شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی پرواز طراحی بهینه سیستم کنترل وضعیت با طراحی کلاسیک مبتنی بر سعی و خطا مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: طراحی سیستم کنترل وضعیت، جت عکس‌العملی، بهینه‌سازی طراحی، الگوریتم ممتیک، الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره، شبیه‌سازی شش‌درجه‌آزادی غیرخطی

مقدمه

استفاده کرد. به همین دلیل معمولاً از روش‌های دیگر مانند کنترل با جت عکس‌العملی ۱ و یا کنترل بردار تراست استفاده می‌شود. از روش کنترل بردار تراست فقط در زمان روشن بودن موتور و برای کنترل مسیر پرواز می‌توان استفاده کرد. اما از جت عکس‌العملی هم قبل و هم پس از زمان روشن بودن موتور،

وسایل عمودپرتاب تاکتیکی لازم است که وسیله پرنده پس از خارج شدن از پرتابگر، بلافاصله در جهت مورد نظر بچرخد تا بتواند خیلی سریع در مسیر تعیین شده توسط الگوریتم هدایت قرار گیرد. در ابتدای پرواز به دلیل سرعت کم وسیله پرنده، از نیروهای آیرودینامیکی نمی‌توان برای کنترل وسیله پرنده

وسایل، با در نظر گرفتن اثر تداخل جریان هوا و جت جانبی پرداخته شده است [۱].

در سال ۱۹۹۶ ترمن و فلشنر با استفاده از تئوری لیاپانوف یک کلاس جدید از کنترل کننده های پالسی مقاوم برای کنترل وضعیت فضاپیما را توسعه دادند، که رفتار سیستم غیرخطی تحت تأثیر رانشگرهای روشن - خاموش را پیش بینی می کرد [۲]. در سال ۱۹۹۹ کوین لینچ حداقل رانشگرهای جانبی مورد نیاز برای کنترل یک جسم صلب را، که به صورت یک مسئله کنترل بهینه طرح ریزی شده بود، مورد بررسی قرار داد [۳]. در همین سال بنگ و همکاران یک روش جدید کنترل پس خور خروجی برای مانور چرخشی تک محوره یک وسیله پرنده در کمترین زمان با استفاده از رانشگرهای روشن - خاموش ارائه کردند. در این روش از تئوری کنترل بهینه برای پیدا کردن زمان های سوئیچینگ بر اساس مدل ریاضی ساختار متغیر استفاده شده است [۴].

در سال ۲۰۰۳ یک الگوریتم سه ضربه ای برای کنترل وضعیت یک فضاپیمای متقارن محوری توسط هال و همکاران معرفی شد که می توانست مصرف سوخت را برای چرخش هایی با شرایط اولیه غیر صفر کاهش دهد [۵]. در سال ۲۰۰۶ مقاله ای توسط زینگ و همکاران منتشر شد که در آن از روش های کنترل با جت عکس العملی به صورت ضربه ای و کنترل آیرودینامیکی برای رهگیری وسایل پرنده جوی استفاده شد [۶]. در مقاله دیگری که در سال ۲۰۰۷ توسط ریدگلی و همکاران منتشر شد، طراحی اتوپایلوت برای یک وسیله پرنده هوا به هوا، از نوع کنترل با جت عکس العملی و دم کنترل، مورد بررسی قرار گرفت [۷].

مراجع موجود در زمینه استفاده از سیستم های جت عکس العملی در وسایل پرنده غیر چرخان، که در بالا مورد بررسی قرار گرفت، محدود به استفاده از جت عکس العملی عمل کننده به صورت پالس و به عنوان یک سیستم کنترل مستقل یا یک سیستم کمکی برای سیستم کنترل آیرودینامیکی هستند. در این سیستم ها، به دلیل خروج جت از روی بدنه (به صورت شعاعی)، امکان کنترل زاویه رول نیز وجود ندارد. به علاوه در هیچ کدام از این مراجع اشاره ای به جزئیات طراحی سیستمی و فرآیند بهینه سازی طراحی نشده است. در سال ۲۰۱۰ نوبهاری و همکاران طراحی یک سیستم کنترل وضعیت با جت جانبی از نوع پیوسته، که وظیفه کنترل همزمان

هم برای کنترل وضعیت وسیله پرنده و هم برای کنترل مسیر پرواز آن می توان استفاده کرد.

مسئله بررسی شده در این مقاله عبارت است از بهینه سازی سیستم کنترل وضعیت با جت عکس العملی در یک وسیله پرنده عمود پرتاب که جت پس از ورود به درون کانارد، عمود بر سطح آن خارج می شود و نیروی رانش و زاویه جت با تغییر زاویه کانارد به صورت پیوسته قابل تغییر است. وسیله پرنده مورد نظر به گونه ای طراحی شده که ابتدا توسط یک سیستم پرتاب سرد به صورت عمودی تا یک ارتفاع مشخص به سمت بالا پرتاب می شود و سپس قبل از روشن شدن موتور، سیستم کنترل وضعیت باید زاویه پیچ وسیله پرنده را از مقدار ۹۰ درجه به یک مقدار مشخص، که توسط الگوریتم هدایت تعیین شده است، تقلیل دهد تا شرایط اولیه مناسب برای روشن شدن موتور در جهت بهینه و عملکرد بهینه حلقه هدایت فراهم شود. در حین چرخاندن وسیله پرنده در جهت پیچ، این سیستم کنترل وظیفه کنترل زوایای رول و یاو و نیز تامین پایداری وسیله را نیز به عهده دارد. بدیهی است که رسیدن به کمترین زمان چرخش با در نظر گرفتن ملاحظات سیستمی ضروری است.

در چند دهه گذشته استفاده از سیستم های کنترل با جت عکس العملی در بسیاری از وسایل پرنده مورد توجه قرار گرفته است. در یک دهه اخیر و با مطرح شدن موضوعاتی همچون سیستم دفاع موشکی استراتژیک (2SDI) یا سپر دفاع موشکی، که بیشترین توجه آن روی رهگیری ماهواره ها و موشک های بالستیک قاره پیما (3ICBM) در خارج از جو غلیظ است، توجه به استفاده از سیستم های کنترل مبتنی بر جت عکس العملی بیشتر شده است. بدیهی است که سیستم های کنترل آیرودینامیکی قادر به تولید نیروها و گشتاورهای مورد نیاز برای کنترل این وسایل نیستند.

در زمینه سیستم های کنترل با جت عکس العملی از نوع ضربه ای (پالسی) برای اجسام پرنده بدون دوران حول محور طولی فعالیت های تحقیقاتی متنوعی انجام شده است. در مقاله ای که توسط چامپیگنی و لاکائو در سال ۱۹۹۴ منتشر شد، تحقیق مختصری پیرامون جت های جانبی به عنوان سیستم کنترل برخی از وسایل پرنده تاکتیکی ارائه شده است. در این مقاله بیشتر به جنبه های طراحی آیرودینامیکی این

سال‌های اخیر نسخه‌های تطبیقی از الگوریتم‌های ممتیک نیز ارائه شده‌است [۱۰، ۱۲ و ۱۳].

در این مقاله برای طراحی بهینه سیستم کنترل وضعیت، از الگوریتم ممتیک تطبیقی با گدگذاری حقیقی (7) ARCOMA، که اخیراً توسط مولفین توسعه داده شده، استفاده شده‌است [۱۰ و ۱۳]. الگوریتم ARCOMA از یک الگوریتم ژنتیک حالت دائم (8) SSGA برای جستجوی فراگیر و از نسخه ارتقا یافته الگوریتم سیستم پیوسته توده‌ای مورچه‌ها (9) CACS [14] برای جستجوی محلی استفاده می‌کند. تعداد گام‌ها و بازه جستجوی محلی، پارامترهای تطبیقی الگوریتم ARCOMA هستند که برای تنظیم خودکار آنها نیز از مفهومی شبیه به مفهوم واریانس وزنی ارائه شده در مرجع [۱۴] استفاده شده‌است.

با توجه به اینکه اغلب مسائل طراحی بهینه دارای چند تابع هدف و یا به عبارتی چندمنظوره هستند، یک نسخه چندمنظوره نیز برای الگوریتم ARCOMA توسط مولفین ارائه شده‌است [۱۰]. نسخه چندمنظوره، الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره (10) MARCOMA نامیده شده و از آن در بهینه‌سازی همزمان هندسه، جبران‌کننده‌های حلقه‌های کنترلی، قانون هدایت و موتور یک وسیله پرنده مایل پرتاب به صورت پردازش موازی استفاده شده‌است [۱۰].

در این مقاله مسئله طراحی مرجع [۹] مجدداً مورد بررسی قرار گرفته‌است. پارامترهای مربوط به هر زیرسیستم به سه دسته پارامترهای پیش فرض، پارامترهای مستقل طراحی و پارامترهای وابسته دسته‌بندی می‌شوند. پارامترهای پیش فرض، پارامترهایی هستند که یا مقادیر آن برای طراح مشخص است و یا طراح بر اساس تجربه خود براحتی می‌تواند مقادیر معقولی برای آنها در نظر بگیرد. پارامترهای مستقل طراحی توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی و از طریق یک فرآیند تکراری هوشمند به صورت دقیق تنظیم می‌شوند. با معلوم‌بودن پارامترهای پیش فرض و پارامترهای طراحی، در هر بار حدس طرح بهینه توسط الگوریتم بهینه‌سازی، پارامترهای وابسته و به تبع آنها توابع هزینه به کمک معادلات تحلیلی حاکم بر زیرسیستم‌ها و شبیه‌سازی پرواز شش درجه آزادی غیرخطی محاسبه می‌شوند. با توجه به اینکه عموماً برخی از پارامترهای یک زیرسیستم، پارامتر ورودی زیرسیستم‌های دیگر محسوب می‌شوند، تدوین الگوریتم طراحی سیستمی و استخراج ترتیب محاسبات نیز

زوابای رول، پیچ و یاو وسیله پرنده را پس از پرتاب عمودی و قبل از روشن شدن موتور به عهده دارد، مورد بررسی قرار دادند [۸ و ۹]. ایشان در طراحی زیرسیستم‌های مختلف از قبیل مولد گاز، عملگر، مجاری جت و کانارد، از یک فرآیند تکراری مبتنی بر سعی و خطا و توأم با فرضیات مهندسی، بهره‌گیری از روابط تحلیلی، حدس پارامترهای طراحی، طراحی حلقه‌های کنترلی بر اساس تئوری کنترل کلاسیک و در نهایت تکرار فرآیند با حدسیات بهتر تا رسیدن به طرح قابل قبول، استفاده کردند. بدیهی‌است که با توجه به کثرت مجهولات و قیود طراحی استفاده از این روش بسیار مشکل، زمان‌بر و مستلزم داشتن تجربه فراوان در طراحی سیستمی است و لزوماً به بهترین نتیجه طراحی منجر نمی‌شود. یک راهکار برای رفع این مشکلات استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت اتوماسیون فرآیند طراحی و دستیابی به طرح بهینه است.

در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در طراحی بهینه انواع سامانه‌های هوافضایی گسترش یافته‌است. زیرا فرآیند طراحی و مسائل نظیر آن بسیار شبیه به فرآیند تکامل است. الگوریتم‌های تکاملی از نظریه تکامل طبیعی الهام گرفته‌اند. الگوریتم‌های ممتیک ۶ دسته‌ای از الگوریتم‌های تکاملی هستند که از یک الگوریتم ژنتیک برای جستجوی فراگیر و از یک الگوریتم جستجوی محلی برای جستجوی دقیق استفاده می‌کنند و به همین دلیل عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارند [۱۱-۱۳]. عملیات جستجوی محلی در الگوریتم‌های ممتیک را می‌توان مشابه فرآیند تکامل فرهنگی جوامع بشری در نظر گرفت.

یکی از ویژگی‌هایی که یک الگوریتم بهینه‌سازی باید داشته باشد، این است که بتواند یک مسئله بهینه‌سازی ساده را به سرعت و یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده را به دقت و با قابلیت اطمینان بالا حل کند. از این دیدگاه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته تطبیقی و غیرتطبیقی تقسیم می‌شوند. پارامترهای اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیرتطبیقی در حین اجرای الگوریتم ثابت هستند و این باعث می‌شود که عملکرد آنها در حل همه مسائل مطلوب نباشد. در مقابل الگوریتم‌های بهینه‌سازی تطبیقی در حین اجرا پارامترهای خود را متناسب با میزان پیچیدگی مسئله تغییر می‌دهند. این خاصیت باعث می‌شود که بتوانند مسائل با سطح پیچیدگی مختلف را با سرعت، دقت و قابلیت اطمینان قابل قبول حل کنند. در

اجزای زیرسیستم‌های مختلف، فلوجارت طراحی این زیرسیستم‌ها، که در واقع نمای کلی از روند طراحی می‌باشد، تدوین و در شکل ۱ نشان داده شده‌است. توضیحات مربوط به محاسبات هر یک از زیرمجموعه‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

الف- مدل‌سازی سطوح کنترلی

در مدل‌سازی سطوح کنترلی، نیروی جت عکس‌عملی مورد نیاز برای کنترل وضعیت و نیز گشتاور لولای ۱۱، که عملگر باید قادر به تامین آن باشد، محاسبه می‌شود. از طرفی چون سطوح کنترلی علاوه بر فاز کنترل وضعیت، در فاز کنترل آیرودینامیکی نیز وظیفه فراهم کردن نیروها و گشتاورهای موردنیاز وسیله پرنده را به‌عهده دارند، بنابراین در مدل‌سازی آن‌ها باید ملاحظات طراحی هر دو فاز کنترل آیرودینامیکی و کنترل جت عکس‌عملی را مورد توجه قرار داد. در شکل ۲ نیروها و گشتاورهای وارد بر بالک، که ناشی از جت عکس‌عملی و آیرودینامیک هستند، نشان داده شده‌است. همچنین پارامترهای پیش‌فرض، طراحی و وابسته مربوط به هر یک از سطوح کنترلی در جداول ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

در ادامه برای محاسبه بیشینه گشتاور لولا، ابتدا بیشینه نیروی برآی وارد بر هر بالک با توجه به شکل ۳ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{Lc} = \frac{F_{L_{A,max}}}{2\left(\frac{\ell_c}{\ell^*} + 1\right)} \quad (1)$$

که $F_{L_{A,max}}$ برآیند نیروی برآی آیرودینامیکی ناشی از زاویه حمله ($F_{L_{A,C}}$) و نیروی آیرودینامیکی ناشی از انحراف کانارد (F_{L_C}) می‌باشد. سپس گشتاور لولای ناشی از نیروهای آیرودینامیکی به‌صورت زیر بدست می‌آید.

$$M_{H_A} = \ell_{Hing} F_{Lc} \quad (2)$$

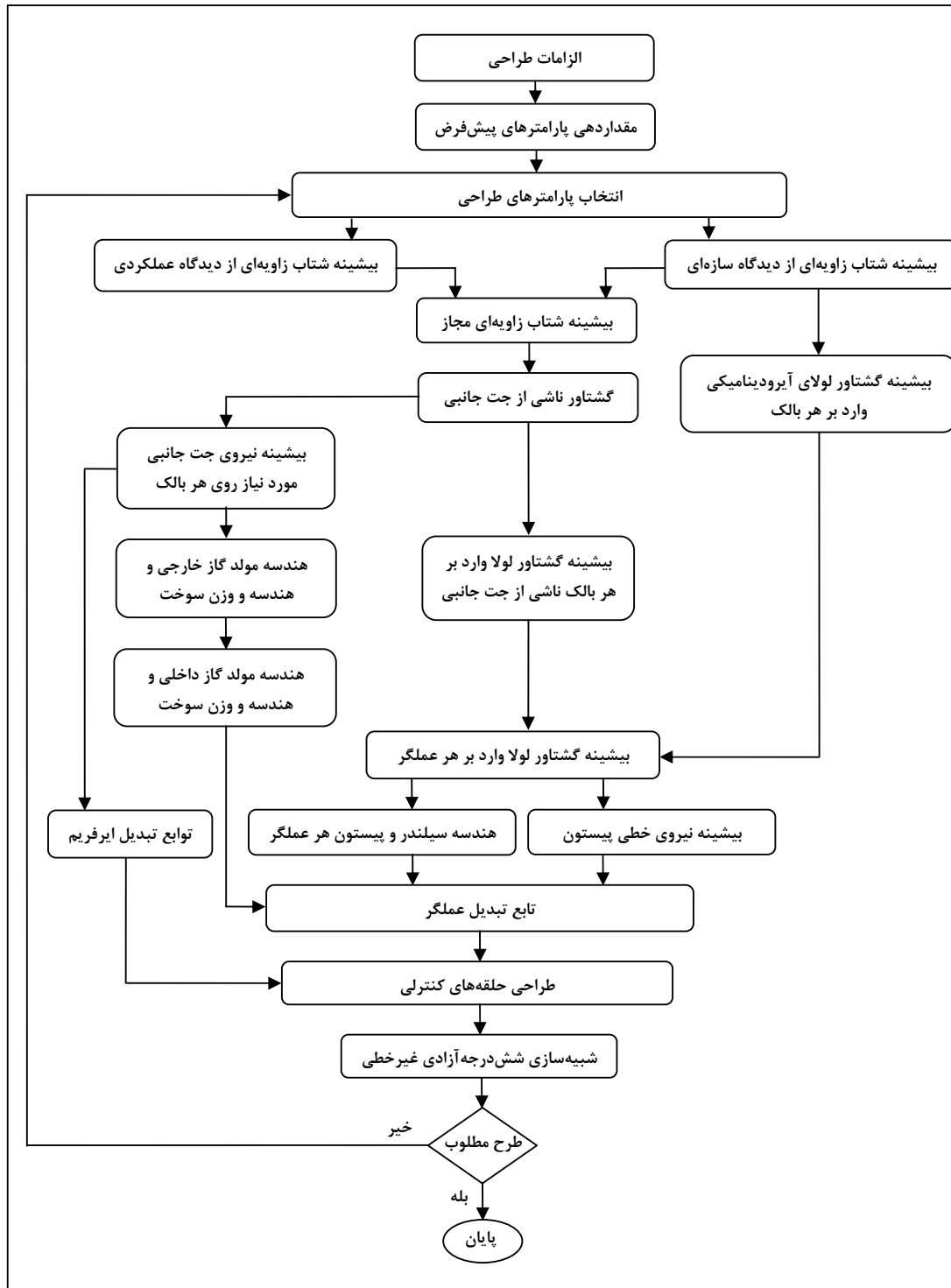
در محاسبه گشتاور لولا ناشی از جت عکس‌عملی، دو رویکرد عملکردی و سازه‌ای مدنظر می‌باشد. دیدگاه اول بر اساس

ضروری است که در این مقاله ارائه شده‌است. به این ترتیب مسئله طراحی همزمان همه زیرسیستم‌های سیستم کنترل وضعیت با جت عکس‌عملی به یک مسئله بهینه‌سازی با ۱۳ پارامتر مجهول (پارامترهای مستقل طراحی)، ۱۳ قید سیستمی و سه تابع هزینه تبدیل و برای حل آن از الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره استفاده شده‌است.

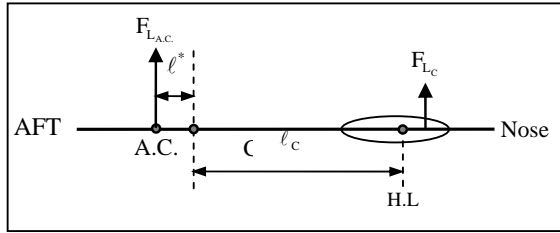
محتوای این مقاله شامل تدوین الگوریتم طراحی سیستمی، مدل‌سازی زیرمجموعه‌های سیستم کنترل وضعیت، مدل‌سازی دینامیک وسیله پرنده، طراحی حلقه‌های کنترلی، معرفی الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره و بهینه‌سازی سیستم کنترل وضعیت بر اساس نتایج شبیه‌سازی پرواز شش‌درجه‌آزادی غیرخطی و به کمک الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره می‌باشد. در پایان نتایج بدست آمده جمع‌بندی شده‌است.

مدل‌سازی سیستم کنترل وضعیت با جت عکس‌عملی

کنترل وضعیت وسیله پرنده در سه کانال رول، پیچ و یاو توسط یک سرومکانیزم نیوماتیکی و یک مولد گاز داغ از نوع سوخت جامد انجام می‌شود. مولد گاز داغ نیز از دو مولد گاز داخلی با گرین کندسوز برای تغذیه عملگرها و مولد گاز خارجی با گرین تندسوز جهت تامین جت عکس‌عملی تشکیل شده‌است. زیرسیستم‌های موجود در سیستم کنترل وضعیت شامل مولد گاز داغ، سطوح کنترلی (کانارد) و عملگرها می‌باشد که مدل ریاضی آنها در مرجع [۸] به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌است. گازهای تولیدشده در مولد گاز خارجی، توسط چهار لوله مجزا به‌طور مستقیم به سطح بدنه و دقیقاً زیر ریشه بالک‌های کنترلی تخلیه می‌شوند. این گازها از طریق دو سوراخ که روی ریشه هر بالک و نزدیک محور شفت آن قرار دارد، به دو طرف سطح جانبی بالک هدایت می‌شوند و نیروی عمودی لازم برای کنترل وضعیت زاویه‌ای وسیله پرنده را فراهم می‌کنند. وقتی بالک در وضعیت صفر قرار دارد، هر دو سطح جانبی بالک به یک نسبت تغذیه می‌شوند. بنابراین در این حالت برآیند نیروهای تولیدشده روی بالک صفر می‌شود. به‌محض اینکه بالک توسط عملگر از وضعیت صفر خارج شد، توازن نیرو در دو طرف سطح بالک به هم می‌خورد و در نتیجه موجب ایجاد یک نیروی برآیندی مخالف صفر و گشتاور روی وسیله پرنده می‌شود [۸]. با توجه به اهمیت ترتیب محاسبات



شکل ۱- فلوچارت طراحی سیستم کنترل وضعیت با جت عکس‌العملی



بیشینه شتاب زاویه‌ای چرخش از زاویه پیچ ۹۰ درجه به یک مقدار نهایی و نیز کمینه زمان چرخش استوار است. در دیدگاه دوم بیشینه شتاب جانبی مجاز از دیدگاه سازه‌ای مبنای محاسبات قرار گرفته است. بر اساس این دو رویکرد بیشینه شتاب زاویه‌ای مجاز را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\ddot{\theta}_{\max} = \min\{\ddot{\theta}_{\max,P}, \ddot{\theta}_{\max,S}\} \quad (3)$$

در رابطه بالا $\ddot{\theta}_{\max,P}$ ، بیشینه شتاب زاویه‌ای از دیدگاه عملکردی و $\ddot{\theta}_{\max,S}$ بیشینه شتاب زاویه‌ای از دیدگاه سازه‌ای می‌باشد. با داشتن تخمین اولیه‌ای از ممان اینرسی عرضی وسیله پرنده (I_{yy})، بیشینه گشتاور لولای ناشی از جت عکس‌عملی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_J = I_{yy} \ddot{\theta}_{\max} \quad (4)$$

از آنجا که در فاز کنترل وضعیت هنوز موتور اصلی وسیله پرنده روشن نشده و وزن سوخت مولد گاز نیز نسبت به وزن کل وسیله بسیار کم است، در طراحی سیستم کنترل وضعیت، از تغییرات ممان‌های اینرسی صرف‌نظر شده است. بیشینه نیروی جت روی هر بالک ($T_{J_{\max}}$) نیز از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$T_{J_{\max}} = \frac{M_J}{2 \cdot l_c} \quad (5)$$

گشتاور لولای ناشی از جت نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$M_{H_J} = l_{\text{Hole}} T_{J_{\max}} \quad (6)$$

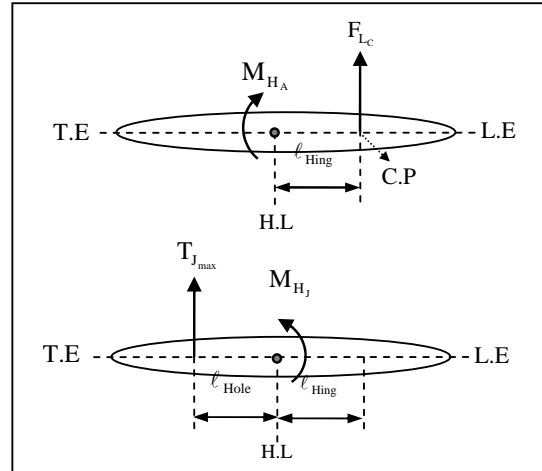
در نهایت بیشینه گشتاور لولا، که هر عملگر باید تامین کند، از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$M_{H_{\max}} = \max(M_{H_J}, M_{H_A}) \quad (7)$$

پارامترهای ($T_{J_{\max}}$) و ($M_{H_{\max}}$) به ترتیب پارامترهای ورودی برای طراحی مولد گاز خارجی و عملگر می‌باشند.

ب- مدل سازی مولد گاز

این زیرسیستم وظیفه تامین فشار مورد نیاز برای عملگرها و همچنین تامین جت خارج شونده از روی کانارد را به عهده دارد. این زیرسیستم از دو مولد گاز استوانه‌ای شکل هم‌محور تشکیل شده است (شکل ۴). مولد گاز خارجی باید قادر به تامین نیروی



شکل ۲- نیروهای آیرودینامیک و جت عکس‌عملی وارد بر بالک

جدول ۱- پارامترهای پیش فرض و طراحی سطوح کنترلی

علائم	پارامترهای پیش فرض	مقدار
δ_{\max}	بیشینه انحراف هر کانارد از وضعیت صفر (deg)	۱۰
$a_{c_{\max}}$	بیشینه شتاب جانبی وارد بر وسیله پرنده (g)	۳۰
l^*	حاشیه پایداری استاتیکی بی بعد شده، به طول کل وسیله پرنده	۰.۰۳
l_c	فاصله مرکز جرم تا خط لولا (m)	۱.۳
θ_{\max}	بیشینه زاویه چرخش از وضعیت قائم (deg)	۴۵
علائم	پارامترهای طراحی	مقدار
\bar{l}_{Hole}	نسبت شعاع مجرای خروج جت، به بیشینه ضخامت کانارد	؟
$\bar{l}_{c_{\max}}$	نسبت بیشینه ضخامت کانارد، به طول ریشه آن	؟
\bar{l}_{Hing}	فاصله مرکز فشار کانارد از خط لولا، به طول ریشه کانارد	؟

جدول ۲- پارامترهای وابسته سطوح کنترلی

علائم	پارامترهای وابسته
$t_{c_{\max}}$	بیشینه ضخامت کانارد
r_{Hole}	شعاع مجرای خروج جت
l_{Hole}	فاصله مرکز مجرای خروج جت از خط لولا
$F_{L_{\max}}$	بیشینه نیروی برآی وارد بر وسیله پرنده
F_{L_c}	بیشینه نیروی برآی وارد بر هر کانارد
l_{Hing}	فاصله مرکز فشار از خط لولا

در نهایت تابع تبدیل هر عملگر به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸، ۹].

$$\frac{\delta(s)}{\varepsilon_i(s)} = \frac{\frac{A_{\text{Piston}} K_{\text{EV}} \ell_{\text{TR}}}{B_{\text{Piston}} \ell_{\text{TR}}^2 + B_{\text{Shaft}} + B_{\text{Linkage}}}}{s \left[\left(\frac{(m_{\text{Piston}} + m_{\text{Shaton}}) \ell_{\text{TR}}^2 + I}{B_{\text{Piston}} \ell_{\text{TR}}^2 + B_{\text{Shaft}} + B_{\text{Linkage}}} \right) s + 1 \right]} = \frac{K_a}{s(\tau s + 1)} \quad (12)$$

در رابطه بالا I ممان اینرسی معادل قابل تعریف برای کانارد، میله رابط و شفت است.

جدول ۳- پارامترهای پیش فرض و طراحی مولد گاز خارجی

مقدار	پارامترهای پیش فرض	علائم
۱۰	درصد افت تراست از خروجی مولد گاز تا خروجی از سطح هر بالک (%)	$\Delta \bar{T}_{\text{out}}$
۱۷۰۰	چگالی سوخت (kg/m^3)	ρ_{out}
۸۵	ضریب حجمی محفظه خارجی (%)	$V_{f_{\text{out}}}$
۱.۱۶۶	نسبت ظرفیت گرمایی ویژه	γ_{out}
۲۵۰	ثابت گازهای خروجی (J/kg.K°)	$R_{P_{\text{out}}}$
۲۲۰۰	دمای شعله (K°)	$T_{F_{\text{out}}}$
۸۷۰	تنش تسلیم پوسته (Mpa)	$\sigma_{Y_{\text{out}}}$
۱.۱	ضریب دمای سوخت	a_{out}
۰.۵۵	شاخص احتراق	n_{out}
۰.۹	نسبت طول سوخت به طول مولد گاز	$\bar{\ell}_{P_{\text{out}}}$
۱.۷	ضریب تراست	$C_{f_{\text{out}}}$
۰.۹	نسبت شعاع خارجی مولد گاز	$\bar{r}_{\text{GG}_{\text{out}}}$
۲۳	قطر کالیبر وسیله پرنده (cm)	D_{Cliber}
۲.۵	ضخامت لاینر (mm)	$\delta_{L_{\text{out}}}$
۲	ضخامت عایق (mm)	$\delta_{I_{\text{out}}}$
مقدار	پارامترهای طراحی	علائم
؟	طول مولد گاز (cm)	ℓ_{GG}
؟	شعاع داخلی مولد گاز (cm)	$r_{\text{GG}_{\text{in}}}$
؟	فشار محفظه احتراق (bar)	$P_{C_{\text{out}}}$

جت عکس‌عملی نسبتاً بزرگ در بازه زمانی کنترل وضعیت، که نسبتاً کم است، باشد. مولد گاز داخلی باید قادر به تغذیه عملگرها در کل زمان پرواز باشد. مقدار فشار تولیدی توسط مولد گاز داخلی باید تقریباً ثابت باشد. این ملاحظات در طراحی شکل گرین سوخت هر یک از این دو مولد گاز در نظر گرفته می‌شود.

طراحی مولد گاز داخلی و خارجی شامل طراحی محفظه احتراق، گرین، عایق، لاینر و نازل برای هر کدام می‌باشد. برای مدل‌سازی این اجزا و محاسبه پارامترهای وابسته از روابط تحلیلی ساده، سوخت و نازل‌های همگرا - واگرا استفاده شده‌است. فرآیند طراحی مولد گاز داخلی و خارجی و روابط مربوط به نحوه محاسبه پارامترهای وابسته به‌طور کامل در مرجع [۸ و ۹] تشریح شده‌است. پارامترهای پیش فرض، طراحی، وابسته و نیز پارامترهای مقید مربوط به مولد گاز داخلی و خارجی در جداول ۳ تا ۶ نشان داده شده‌است.

ج- مدل‌سازی عملگرها

عملگر شامل یک شیربرقی و مجموعه سیلندر و پیستون است. مکانیزم عملکرد آن در شکل ۵ آورده شده‌است. بیشینه نیروی خطی وارد بر هر پیستون از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$F_{\text{Piston}_{\text{max}}} = \frac{M_{H_{\text{max}}}}{\ell_{\text{TR}}} \quad (8)$$

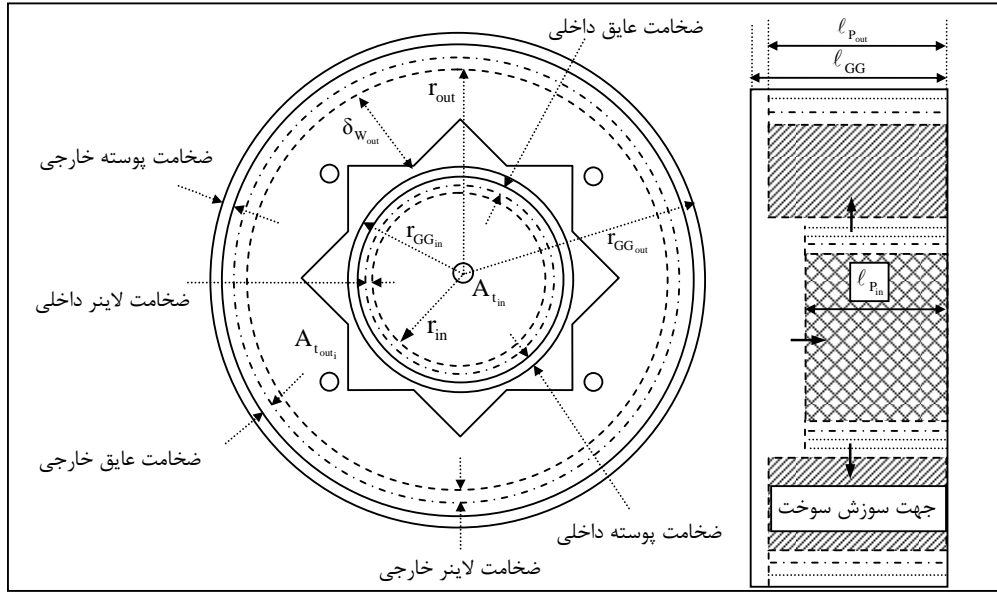
از طرفی نیروی خطی پیستون متناسب است با:

$$F_{\text{Piston}} = A_{\text{Piston}} K_{\text{EV}} \varepsilon_i \quad (9)$$

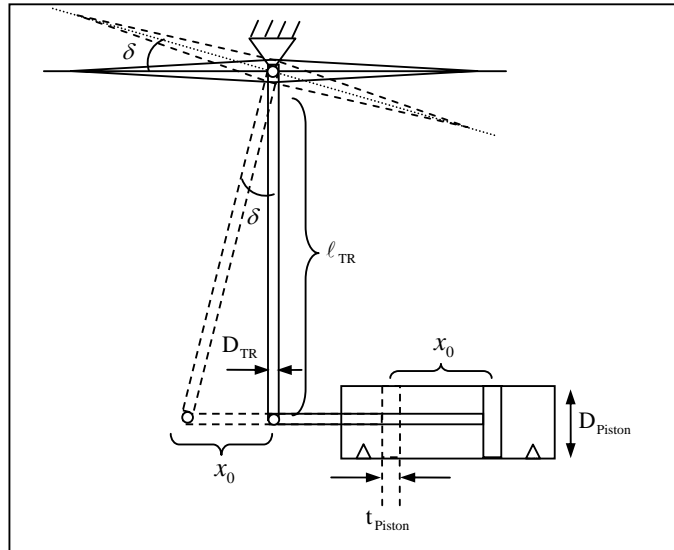
$$F_{\text{Piston}} = (m_{\text{Piston}} + m_{\text{Shaton}}) \ddot{x}_0 + B_{\text{Piston}} \dot{x}_0 + F' \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰)، F' نیروی لازم برای غلبه بر اینرسی و اصطکاک اجزای متحرک سرومکانیزم است. پارامترهای پیش فرض، طراحی و وابسته و نیز پارامترهای مقید هر عملگر در جداول ۷ و ۸ آورده شده‌است. رابطه بین جابجایی خطی پیستون و چرخش کانارد به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$x_0 = \ell_{\text{TR}} \delta \quad (11)$$



شکل ۳- نمای برش خورده مولد گاز داغ



شکل ۵- شماتیکی از مکانیزم عملکرد عملگر.

جدول ۴- پارامترهای وابسته و مقید مولد گاز خارجی

علائم	پارامترهای وابسته
T_{out}	تراست خروجی از مولد گاز (N)
$A_{t_{out1}}$	مساحت هر گلوگاه (cm^2)
$D_{t_{out1}}$	قطر هر گلوگاه (cm)
\dot{m}_{out}	دبی جرمی محصولات احتراق (kg/s)
$\delta_{Case_{out}}$	ضخامت پوسته مولد گاز (mm)
r_{out}	شعاع خارجی گرین (cm)
$\ell_{P_{out}}$	طول سوخت (cm)
$m_{P_{out}}$	جرم سوخت (kg)
$t_{b_{out}}$	زمان سوزش (sec)
$\delta_{W_{out}}$	ضخامت یا وب سوخت (cm)
$A_{Port_{out1}}$	مساحت هر یک از مجراهای خروج گاز (cm^2)
$D_{e_{out1}}$	قطر خارجی هر یک از مجراهای خروج گاز (cm)
علائم	پارامترهای مقید
$I_{SP_{out}}$	ضربه ویژه سوخت (sec)
\dot{r}_{out}	سرعت سوزش سوخت (mm/s)
$\frac{\delta_{W_{out}}}{r_{out} - r_{GG_{in}}}$	نسبت ضخامت وب سوخت، به شعاع مفید مولد گاز
$\frac{A_{Port_{out}}}{A_{t_{out}}}$	مجموع مساحت چهار مجرای خروج گاز، به مجموع مساحت چهار گلوگاه
علائم	پارامترهای وابسته
ρ_{in}	چگالی سوخت (kg/m^3)
$V_{f_{in}}$	ضریب حجمی محفظه احتراق (%)
γ_{in}	نسبت ظرفیت گرمایی ویژه
$R_{P_{in}}$	ثابت گازهای خروجی ($J/kg.K^\circ$)
$T_{F_{in}}$	دمای شعله ($J/kg.K^\circ$)
a_{in}	ضریب دمای سوخت
n_{in}	شاخص احتراق
t_{bin}	زمان سوزش (sec)
$\sigma_{Y_{in}}$	تنش تسلیم پوسته (Mpa)
$C_{f_{in}}$	ضریب تراست
$\delta_{L_{in}}$	ضخامت لاینر (mm)
$\delta_{I_{in}}$	ضخامت عایق (mm)
علائم	پارامترهای طراحی
$P_{C_{in}}/P_{C_{out}}$	نسبت فشار محفظه مولد گاز داخلی به خارجی ؟
$P_{e_{in}}/P_{C_{in}}$	نسبت فشار خروجی به فشار محفظه داخلی ؟

جدول ۶- پارامترهای وابسته و مقید مولد گاز داخلی

علائم	پارامترهای وابسته
$\ell_{P_{in}}$	طول سوخت (cm)
$\delta_{Case_{in}}$	ضخامت پوسته (mm)
r_{in}	شعاع گرین سوخت (cm)
$m_{P_{in}}$	جرم سوخت (kg)
\dot{m}_{in}	دبی جرمی محصولات احتراق (kg/s)
$A_{t_{in}}$	مساحت گلوگاه (cm^2)
$M_{e_{in}}$	ماخ جریان خروجی
$D_{e_{in}}$	قطر مجرای خروج گاز
$D_{t_{in}}$	قطر گلوگاه (mm)
T_{in}	تراست، در خروجی از مولد گاز (N)
علائم	پارامترهای مقید
$\ell_{P_{in}}$	سرعت سوزش (mm/s)
$I_{SP_{in}}$	ضربه ویژه سوخت (sec)
علائم	پارامترهای پیش فرض و طراحی در عملگر
P_{atm}	فشار اتمسفر (bar) ۰.۸
b_C	دهانه هر کانارد (cm) ۱۵
ρ_{Al}	چگالی آلومینیوم (kg/m^3) ۲۴۰۰
ρ_{Steel}	چگالی آهن (kg/m^3) ۷۸۰۰
B_{Piston}	اصطکاک ویسکوز پیستون هر عملگر (N.s/m) ۰.۲
B_{Shaft}	اصطکاک ویسکوز شفت کانارد (N.s/m) ۰.۱۵
$B_{Linkage}$	اصطکاک ویسکوز اتصالات هر عملگر (N.s/m) ۰.۱۵
ϵ_{max}	بیشینه انحراف نازل شیربرقی هر عملگر (deg) ۵
\bar{D}_{Shaton}	نسبت قطر شاتون به قطر پیستون هر عملگر ۰.۲۵
$\bar{\ell}_{Shaton}$	نسبت طول شاتون به قطر کالیبر وسیله پرنده ۰.۳
$\bar{\ell}_{Shaft}$	نسبت طول شفت به قطر کالیبر وسیله پرنده ۰.۲
\bar{t}_{Piston}	نسبت ضخامت پیستون به قطر پیستون هر عملگر ۰.۱
$\bar{m}_{Linkage}$	نسبت جرم اتصالات به جرم میله رابط هر عملگر ۰.۲
\bar{I}_G	نسبت شعاع ژیراسیون کانارد به طول ریشه آن ۰.۲۵
\bar{D}	نسبت قطر میله رابط به ماکزیمم ضخامت کانارد ۰.۶
علائم	پارامترهای طراحی
$\bar{\ell}_{TR}$	نسبت طول میله رابط به قطر کالیبر وسیله پرنده ؟

جدول ۵- پارامترهای پیش فرض و طراحی در مولد گاز داخلی

جدول ۸- پارامترهای وابسته و مقید عملگر

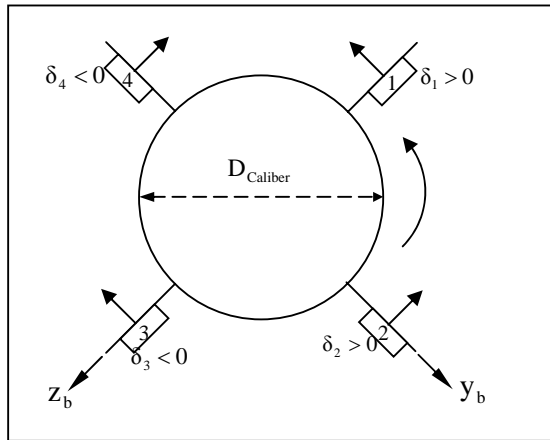
علائم	پارامترهای وابسته
l_{TR}	طول میله رابط هر عملگر (cm)
F_{Piston}	بیشینه نیروی خطی پیستون در هر عملگر (N)
D_{Piston}	قطر پیستون هر عملگر (cm)
k_{EV}	بیشینه بهره شیربرقی هر عملگر (bar/rad)
m_{Shaton}	جرم شاتون هر عملگر (kg)
m_{Piston}	جرم پیستون هر عملگر (kg)
I	ممان اینرسی معادل اجزای متحرک کانارد ($kg.m^2$)
علائم	پارامترهای مقید
$\frac{D_{Piston}}{D_{Caliber}}$	نسبت قطر پیستون به قطر کالیبر وسیله پرنده

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_J \\ Y_J \\ Z_J \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{Bmatrix} L \\ M \\ N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_J \\ M_J \\ N_J \end{Bmatrix} \quad (17)$$

بدیهی است که گشتاور ناشی از نیروی جاذبه به دلیل عبور امتداد این نیرو از مرکز جرم صفر است. همچنین پس از پرتاب قائم و رو به بالای وسیله پرنده، که توسط یک سیستم پرتاب سرد انجام می‌شود، سرعت تقریبی وسیله در لحظاتی که سیستم کنترل وضعیت شروع به کار می‌کند، بسیار کم و در حدود ۵ متر بر ثانیه است. بنابراین در فاز کنترل وضعیت می‌توان از نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی صرف نظر کرد.

برای محاسبه نیروها و گشتاورهای ناشی از جت عکس‌العملی و ارتباط آن‌ها (ها) با میزان انحراف بالک‌های کنترلی، ابتدا نحوه شماره گذاری بالک‌های کنترلی نسبت به مختصات بدنی و سپس جهت‌های مثبت و منفی انحراف هر بالک تعریف می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶- شماره گذاری بالک‌های کنترلی در دستگاه بدنی

بالک‌های ۱ و ۳ نقش رادر، بالک‌های ۲ و ۴ نقش الویتور و هر چهار بالک نقش ایلوران را ایفا می‌کنند. روابط حاکم بین مقدار انحراف الویتور، رادر و ایلوران ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$) با مقدار انحراف بالک‌های ۱ تا ۴ به صورت زیر است.

د- مدل سازی دینامیک وسیله پرنده

در این بخش مدل دینامیکی وسیله پرنده مورد نظر معرفی می‌شود. از این مدل برای شبیه‌سازی پرواز وسیله و از فرم ساده شده آن برای استخراج توابع تبدیل بدنه استفاده خواهد شد. با فرض صلب بودن وسیله پرنده و ناچیز بودن تغییرات وزن و ممان‌های اینرسی در فاز کنترل وضعیت، برای حرکت انتقالی و دورانی خواهیم داشت.

$$\begin{cases} \mathbf{f} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ \mathbf{m} = I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

که \mathbf{f} و \mathbf{m} به ترتیب بردار مجموع نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر وسیله پرنده، بردار سرعت مرکز جرم و $\boldsymbol{\omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای وسیله پرنده می‌باشد. فرم اسکالر معادلات حرکت وسیله پرنده در دستگاه بدنی با فرض تقارن محوری به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{cases} \sum f_x = m(\dot{u} + wq - vr) = X \\ \sum f_y = m(\dot{v} + ur - wp) = Y \\ \sum f_z = m(\dot{w} - uq + vp) = Z \\ I_{xx}\dot{p} = L \\ I_{yy}\dot{q} - (I_{zz} - I_{xx})rp = M \\ I_{zz}\dot{r} - (I_{xx} - I_{yy})pq = N \end{cases} \quad (15)$$

نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر وسیله پرنده، ناشی از وزن و جت عکس‌العملی هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

با توجه به اینکه در فاز کنترل وضعیت از نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی به دلیل ناچیز بودن سرعت صرف‌نظر می‌شود و همچنین با توجه به اینکه وسیله پرنده از نوع گردش با لغزش (STT)^{۱۲} بوده و نرخ رول آن کم است، با ساده‌سازی رابطه (۱۵) براحتی می‌توان توابع تبدیل وضعیت بدنه به ورودی‌های کنترلی را به صورت زیر استخراج کرد.

$$\begin{cases} \frac{\phi(s)}{\delta_a(s)} = \frac{L_{J_{\delta_a}}}{I_{xx}s^2} \\ \frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = \frac{M_{J_{\delta_e}}}{I_{yy}s^2} \\ \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{N_{J_{\delta_r}}}{I_{zz}s^2} \end{cases} \quad (26)$$

ه- مدل‌سازی حلقه‌های کنترلی

در این بخش نحوه مدل‌سازی حلقه‌های کنترل زوایای رول، پیچ و یاو و نیز حلقه سرو و همچنین نحوه طراحی کنترل‌کننده برای هر کدام از آنها تشریح می‌شود. در شکل ۷ حلقه کنترلی سرو نشان داده شده است. در حلقه سرو برای اندازه‌گیری موقعیت لحظه‌ای بالک از یک پتانسیومتر یا اینکودر می‌توان استفاده کرد. در شکل‌های ۸ و ۹ حلقه‌های کنترلی رول و پیچ نشان داده شده است. به دلیل تقارن وسیله پرنده، حلقه کنترل یاو شبیه حلقه کنترل پیچ است. در هر یک از حلقه‌های کنترل وضعیت رول، پیچ و یاو از یک جایروی آزاد برای اندازه‌گیری زاویه استفاده می‌شود.

پارامترهای پیش‌فرض، طراحی، وابسته و مقید حلقه‌های کنترلی در جداول ۹ و ۱۰ تعریف شده است. در طراحی همه حلقه‌های کنترلی دستیابی به حداکثر خطای ماندگار ۱۰ درصد در پاسخ به ورودی پله و حداقل حد فاز ۵۵ درجه مدنظر قرار گرفته است. پارامترهای طراحی C_1 ، C_2 و C_3 ظاهر شده در جدول ۹ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_1 = t_{rp} / t_{min} \quad (27)$$

$$C_2 = \omega_{BW_R} / \omega_{BW_P} \quad (28)$$

$$C_3 = \omega_{BW_R} / \omega_{BW_S} \quad (29)$$

پارامترهای ω_{BW_P} ، ω_{BW_R} ، ω_{BW_S} ، t_{rp} به ترتیب زمان برخاست حلقه پیچ و پهنای باند حلقه‌های سرو، رول و پیچ هستند. دینامیک هر یک از حلقه‌های کنترلی سرو، رول، پیچ و یاو به صورتی است که استفاده از جبران‌سازهای پیش‌فاز همه نیازهای کنترلی را برآورده می‌کند [۸ و ۹]. با استفاده از تئوری کنترل خطی و با معلوم‌بودن پارامترهای پیش‌فرض

$$\delta_e = \frac{\delta_2 - \delta_4}{2} \quad (18)$$

$$\delta_r = \frac{\delta_1 - \delta_3}{2}$$

$$\delta_a = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}{4}$$

چنانچه مقدار نیروی جت عکس‌عملی خروجی از سطح هر بالک تابعی خطی از زاویه انحراف بالک فرض شود، می‌توان مقدار آن را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$T_{J_i} = T_{J_{max}} \cos \lambda \frac{\delta_i}{\delta_{max}} \quad (19)$$

در رابطه بالا $T_{J_{max}}$ بیشینه نیروی جت عکس‌عملی روی هر بالک، λ زاویه خروج جت با امتداد عمود بر بالک و δ_i زاویه انحراف هر بالک از وضعیت صفر آن هستند. به این ترتیب ضریب مشتق نیروی جت عکس‌عملی هر بالک به مقدار انحراف آن بالک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_{J_{\delta}} = \frac{\partial T_{J_i}}{\partial \delta_i} = \frac{T_{J_{max}} \cos \lambda}{\delta_{max}} \quad (20)$$

در ادامه روابط حاکم بین نیروها و گشتاورهای ناشی از جت عکس‌عملی با این مشتق کنترلی جدید استخراج خواهد شد.

با استفاده از رابطه (۱۸) می‌توان رابطه بین نیروهای ناشی از جت عکس‌عملی با میزان انحراف رادر و الویتور را به صورت زیر بدست آورد:

$$Y_J = -T_{J_1} + T_{J_3} = -2T_{J_{\delta}} \delta_r \quad (21)$$

$$Z_J = -T_{J_2} + T_{J_4} = -2T_{J_{\delta}} \delta_e \quad (22)$$

به همین ترتیب رابطه بین گشتاورهای ناشی از جت عکس‌عملی با میزان انحراف ایلوران، الویتور و رادر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_J = 4 \left(\frac{D_{Caliber}}{2} + b_J \right) T_{J_{\delta}} \delta_a = L_{J_{\delta_a}} \delta_a \quad (23)$$

$$M_J = 2(d_{CG} - d_J) T_{J_{\delta}} \delta_e = M_{J_{\delta_e}} \delta_e \quad (24)$$

$$N_J = -2(d_{CG} - d_J) T_{J_{\delta}} \delta_r = N_{J_{\delta_r}} \delta_r \quad (25)$$

در روابط بالا d_J و d_{CG} به ترتیب فاصله مرکزجرم و محل خروج جت، از نوک وسیله پرنده و b_J فاصله شعاعی محل خروج جت تا محور طولی هستند. در نهایت لازم است که توابع تبدیل بدنه استخراج شود تا با استفاده از آن (ها) بتوان کنترل‌کننده‌های سیستم کنترل وضعیت را طراحی کرد.

جدول ۱۰- پارامترهای وابسته و قیود حلقه‌های کنترلی

علائم	پارامترهای وابسته
t_{fp}	زمان برخاست حلقه پیچ (sec)
t_{sp}	زمان نشست حلقه پیچ (sec)
t_{rR}	زمان برخاست حلقه رول (sec)
t_{sR}	زمان نشست حلقه رول (sec)
ω_{BWp}	پهنای باند حلقه پیچ (rad/s)
ω_{BWR}	پهنای باند حلقه رول (rad/s)
ω_{BWS}	پهنای باند حلقه سرو (rad/s)

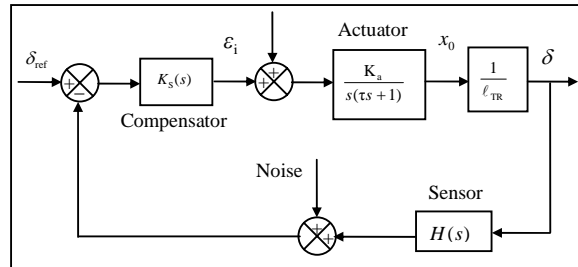
علائم	پارامترهای مقید
$e_{ss\max}$	بیشینه خطای حالت ماندگار به ورودی پله (درصد)
α_S	نسبت قطب به صفر جبران‌ساز حلقه سرو
α_R	نسبت قطب به صفر جبران‌ساز حلقه رول
α_p	نسبت قطب به صفر جبران‌ساز حلقه پیچ
K_{vs}	ثابت خطای ایستای سرعت جبران‌ساز حلقه سرو (sec^{-1})
K_{ar}	ثابت خطای ایستای شتاب جبران‌ساز حلقه رول (sec^{-1})
K_{ap}	ثابت خطای ایستای شتاب جبران‌ساز حلقه پیچ (sec^{-1})

الگوریتم ممیتیک تطبیقی

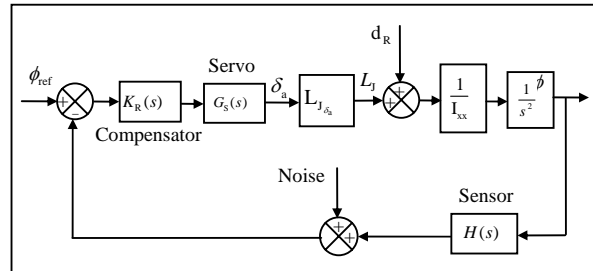
ایده اصلی الگوریتم ARCOMA داشتن خاصیت تطبیقی با مسئله مورد بررسی است. این ویژگی به خصوص در توابعی که دارای ابعاد زیاد، یا دارای کمینه‌های محلی متعددی هستند، اهمیت بیشتری می‌یابد.

در الگوریتم ARCOMA از الگوریتم ژنتیک حالت دائم (SSGA) برای جستجوی فراگیر و از الگوریتم سیستم پیوسته کلونی مورچه‌ها (CACS) [۱۴] برای جستجوی محلی استفاده شده‌است. در الگوریتم‌های مبتنی بر SSGA، در هر نسل فقط یک یا دو فرزند ایجاد می‌شود و یک فرزند خوب تا زمانی که فرزند بهتری یافته نشود، جایگزین نخواهد شد. هر چند در حل مسائل بهینه‌سازی از SSGAها کمتر از GAها استفاده می‌شود، ولی استفاده از آن(ها) را در الگوریتم‌های ممیتیک بسیار مناسب می‌دانند [۱۵].

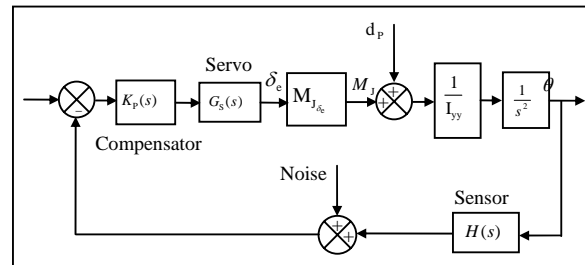
حلقه‌های کنترلی می‌توان بهره، صفر و قطب هر یک از این جبران‌کننده‌ها را به صورت تابعی از پارامترهای طراحی حلقه‌های کنترلی محاسبه کرد.



شکل ۷- نمودار بلوکی حلقه سرو



شکل ۸- نمودار بلوکی حلقه رول



شکل ۹- نمودار بلوکی حلقه پیچ

جدول ۹- پارامترهای پیش‌فرض و طراحی حلقه‌های کنترلی

علائم	پارامترهای پیش‌فرض	مقدار
$P.M_{\min}$	حداقل حد فاز (deg)	۵۵
علائم	پارامترهای طراحی	مقدار
t_{\min}	کمترین زمان چرخش از ۹۰ به ۴۵ درجه (sec)	؟
C_1	نسبت زمان برخاست حلقه پیچ، به کمترین زمان چرخش از ۹۰ به ۴۵ درجه	؟
C_2	نسبت پهنای باند حلقه رول به حلقه پیچ	؟
C_3	نسبت پهنای باند حلقه رول به حلقه سرو	؟

RWS فرزندهای متولدشده جایگزین بدترین افراد جمعیت می‌شوند. این استراتژی یک سیاست نخبه‌گرایی است و استفاده از آن باعث بهبود سرعت همگرایی الگوریتم می‌شود.

پس از مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم ARCOMA، نسل اول به صورت اتفاقی تشکیل شده و وارد حلقه اصلی الگوریتم می‌شوند. در هر بار تکرار حلقه اصلی باید تعداد $N_{\text{offspring}}$ فرزند تشکیل شود. تولید هر فرزند شامل انتخاب دو ولی، اعمال عملگرهای ترکیب و جهش و در نهایت جستجوی محلی است. پس از تکرار این فرآیند به تعداد $N_{\text{offspring}}$ جمعیت تصفیه و حلقه اصلی تکرار می‌شود. تصفیه جمعیت بدین معنی است که افراد بدتر دور ریخته شده و فرزندان، در صورت بهتر بودن، جایگزین آنها می‌شوند. تکرار حلقه اصلی تا زمانی که شرط توقف الگوریتم ارضا نشده باشد، ادامه می‌یابد. معیار بدتر یا بهتر بودن افراد در جمعیت، رتبه‌بندی^{۱۹} آنها براساس مقدار تابع هدف است.

از الگوریتم ARCOMA برای حل مسائل نمونه تک‌منظوره و پیوسته همایش (CEC2005)^{۲۰} [۱۸] استفاده شده و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی عملکرد قابل ملاحظه و خوبی از خود نشان داده‌است [۱۳].

الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره

مسائل مهندسی علاوه بر داشتن تنوع زیاد در متغیرهای طراحی، اغلب دارای اهداف متنوع یا چندمنظوره نیز هستند. الگوریتم ARCOMA، الگوریتمی است که توانایی حل مسائل مقیاس بزرگ و پیوسته با یک تابع هدف را دارد. برای پرداختن به مسائلی که علاوه بر داشتن چنین خواصی، چندمنظوره (دارای چند تابع هدف) نیز هستند، الگوریتم ARCOMA به نسخه چندمنظوره آن تعمیم داده شده و الگوریتم جدید دیگری با نام MARCOMA طراحی شده‌است [۱۰]. در این قسمت به معرفی مختصر الگوریتم MARCOMA پرداخته می‌شود.

الگوریتم MARCOMA در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. به‌طور کلی تفاوت MARCOMA با نسخه تک‌منظوره آن (ARCOMA) در نحوه رتبه‌بندی افراد (Ranking)، نحوه گزینش والدین (Selection)، نحوه جایگزین کردن افراد ضعیف موجود در جمعیت (Replacement) و همچنین نحوه جستجوی محلی است. در

الگوریتم CACS یک الگوریتم تک‌منظوره کُد حقیقی است. این الگوریتم بر اساس کلونی مورچه‌هاست و مورچه‌ها مقصد بعدی خود را بر اساس توزیع فرمون موجود در محیط جستجو انتخاب می‌کنند. پس از این که مقصد جدید انتخاب شد، تابع هدف متناظر با آن محاسبه شده، توزیع فرمون بروز می‌شود و این فرآیند ادامه می‌یابد. تعداد تکرارهای لازم در هر بار جستجوی محلی برای یک فرزند و نسبت دامنه جستجوی محلی به جستجوی فراگیر، دو پارامتر تطبیقی هستند که بسته به پیچیدگی مسئله در حال حل، توسط الگوریتم تعیین می‌شوند. اگر جواب‌های خوب به هم نزدیک باشند، توزیع فرمون محدود و تعداد تکرار جستجوی محلی بیشتر می‌شود تا جستجوی محلی بیشتر و دقیق‌تر انجام شود. همچنین، وقتی جواب‌های خوب از هم دور شوند، بازه جستجوی محلی بزرگ و تعداد تکرارهای جستجوی محلی کم می‌شود تا جستجوی فراگیر بیشتر انجام شود.

الگوریتم ARCOMA دارای چهار عملگر انتخاب، جایگزینی، ترکیب و جهش است [۱۳]. در عملگر انتخاب برای تولید هر فرزند، دو ولی انتخاب می‌شوند. فرزند جدید پس از اعمال عملگرهای ترکیب و جهش تولید می‌شود. در ARCOMA انتخاب والدین براساس روش $NAM^{۱۲}$ انجام می‌شود [۱۶]. در روش NAM یکی از والدین از روش چرخ رولت^{۱۴} و دیگری از میان افرادی که دارای کمترین شباهت به اولی است، انتخاب می‌شود. میزان شباهت بین دو فرد نیز از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی ارزیابی می‌شود. به این ترتیب تنوع^{۱۵} والدین افزایش می‌یابد و این موجب می‌شود توانایی خروج الگوریتم از کمینه محلی افزایش یابد.

عملگر ترکیب استفاده‌شده در الگوریتم ARCOMA شبیه روش BLX [۱۷] است، با این تفاوت که در ARCOMA انتخاب فرزند محدود به فضای بین والدین نیست و می‌تواند در اشتراک کل فضای جستجو با امتداد والدین نیز قرار گیرد که این ایده عملکرد الگوریتم را بهبود می‌بخشد [۱۳].

در الگوریتم ARCOMA، از عملگر جهش غیر واحد^{۱۶} استفاده شده‌است. این روش یک روش پیوسته است که با تغییر تصادفی یک یا چند بُعد مسئله باعث جهش ژنتیکی می‌شود. در الگوریتم ARCOMA از استراتژی جایگزینی بدترین‌ها (RWS)^{۱۷} به‌عنوان عملگر جایگزینی^{۱۸} استفاده شده‌است. در

الگوریتم MARCOMA محدودیتی از نظر تعداد متغیرهای طراحی و تعداد توابع هزینه وجود ندارد.

در الگوریتم‌های تک‌منظوره، افرادی رتبه بهتری دارند که مقدار تابع هدف کمتری نسبت به سایرین داشته باشند. اما در الگوریتم‌های چندمنظوره باید بررسی کرد که از دیدگاه کدام تابع یا توابع، فرد بهتر است. این مشکل را شرط بهینه‌گی پرتو^{۲۱} حل کرده است. در استراتژی پرتو، فردی بهتر (غالب) است که توابع هدفش از توابع هدف سایر افراد کمتر یا برابر بوده و حداقل یکی از توابع هدف آن کمتر از بقیه باشد. افرادی که چنین شرایطی را احراز کنند به مجموعه پرتو راه می‌یابند. در یک مجموعه پرتو هیچ فردی به فرد دیگر غلبه ندارد و همه آنها جزو مجموعه جواب مسئله هستند. یکی از بهترین ایده‌هایی که در این زمینه مطرح است، ایده طبقه‌بندی نقاط غیرغالب^{۲۲} است که نخستین بار در الگوریتم (NSGA)^{۲۳} [۱۹] مطرح شد. در این روش لایه‌هایی از نقاط غیرغالب در فضای عملکرد تشکیل می‌شوند. به هر لایه یک رتبه اختصاص می‌یابد و افراد براساس رتبه‌ای که لایه‌های غیرغالب فضای عملکرد دارند، رتبه‌بندی می‌شوند.

در الگوریتم ARCOMA گزینش والدین یا جایگزین شدن آنها بر اساس استراتژی گزینش (یا جایگزین شدن) تناسبی است؛ به این مفهوم که شانس انتخاب هر فرد متناسب با میزان برازندگی یا برازنده‌نبودن وی است. در MARCOMA آنچه که میزان برازندگی یا برازنده‌نبودن یک فرد را مشخص می‌کند، رتبه لایه‌ای از فضای عملکرد است که آن فرد در آن لایه قرار گرفته است. به استثنای حالتی که کل افراد جمعیت در لایه اول قرار گیرند و لایه دیگری وجود نداشته باشد؛ در بقیه حالت‌ها افراد داخل یک لایه همگی دارای شانس انتخاب برابر و افراد حاضر در لایه‌های مختلف دارای شانس انتخاب متناسب با رتبه هر لایه هستند. در حالتی که فقط یک لایه در فضای عملکرد موجود باشد و یا به بیان دیگر کل افراد جمعیت غیرغالب باشند، از روش حذف از نواحی شلوغ (CDA)^{۲۴} استفاده می‌شود [۲۰]. در این روش فاصله هر فرد در فضای عملکرد، با افراد مجاور خود محاسبه شده و افرادی که در نواحی شلوغ‌تر هستند، حذف می‌شوند. این تمهید باعث می‌شود الگوریتم جبهه پرتو یکنواختی ایجاد کند. علاوه بر این از حذف افرادی که در نواحی خلوت قرار دارند جلوگیری می‌شود.

از دیگر تفاوت‌های الگوریتم MARCOMA با الگوریتم ARCOMA در برنامه جستجوگر محلی آن است. عملیات جستجوی محلی در الگوریتم‌های ممتیک را می‌توان مشابه فرآیند تکامل فرهنگی جوامع بشری در نظر گرفت. به این مفهوم که خصوصیات ژنتیکی هر فرد پس از تولد ثابت است اما خصوصیات فرهنگی وی می‌تواند در طول عمر کماکان تکامل یابد. الگوریتم MARCOMA از نسخه ارتقایافته الگوریتم CACS [۱۴] به نام MOCACS استفاده می‌کند. تفاوت MOCACS با CACS در نحوه تعیین بهترین فرد (افراد) جمعیت و نحوه بروزکردن توزیع فرمون در فضای جستجو است. در الگوریتم CACS در هر لحظه فقط یک فرد به‌عنوان بهترین فرد جمعیت مطرح است. موقعیت این فرد مرکز تابع توزیع فرمون در فضای جستجو است و واریانس تابع توزیع فرمون بر اساس یک تابع واریانس وزنی تعیین می‌شود و همزمان به میزان پراکندگی و برازندگی سایر افراد در فضای جستجو بستگی دارد [۱۴]. در الگوریتم MOCACS برای رتبه‌بندی افراد از ایده طبقه‌بندی نقاط غیرغالب استفاده می‌شود. در این الگوریتم مجموعه‌ای از افراد در جمعیت، که در لایه اول (جبهه پرتو) قرار دارند، به‌عنوان بهترین افراد شناخته می‌شوند و رتبه اول به همگی آنها اختصاص داده می‌شود. در هر گام از جستجوی محلی یکی از این افراد به‌صورت تصادفی به‌عنوان مرکز تابع توزیع فرمون انتخاب می‌شود و میزان واریانس تابع توزیع فرمون به میزان پراکندگی سایر افراد در فضای جستجو و رتبه لایه‌ای از فضای عملکرد، که فرد مربوطه در آن قرار گرفته است، بستگی دارد.

الگوریتم MARCOMA دارای شش پارامتر تنظیم‌شونده شامل تعداد افراد جمعیت (N_{POP})، تعداد فرزندهای متولدشده هر نسل ($N_{offspring}$)، تعداد نامزدهای انتخاب به‌عنوان ولی دوم، احتمال انجام عملگر جهش (P_{mut})، ضریب تطبیق تعداد تکرارهای جستجوی محلی برای هر فرزند (β_{LS}) و نیز ضریب تطبیق دامنه جستجوی محلی (α_{LS}) می‌باشد. مقایسه نتایج عملکرد الگوریتم MARCOMA با الگوریتم‌های دیگری مانند (SMPSO)^{۲۵}، (PAES)^{۲۶} و (MOGA2)^{۲۷} نشان می‌دهد که الگوریتم MARCOMA عملکرد قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر الگوریتم‌های فوق دارد و عموماً با تعداد تکرارهای کمتر، به همان دقت الگوریتم‌های مذکور می‌رسد [۱۰].

اولیه روشن شود تا وسیله پرنده سریعاً شتاب بگیرد و پایدار شود، کمینه‌کردن زمان نشست (t_{sp}) و همچنین زمان برخاست حلقه پیچ (t_{rp}) ضروری است. به علاوه دقت پاسخ گذرای حلقه پیچ در گرو کاهش درصد فراجش نیز هست. واضح است که اگر همزمان t_{rp} و درصد فراجش را کمینه کنیم، t_{sp} نیز کمینه خواهد شد. البته عکس این مطلب لزوماً صحیح نیست. به همین دلیل در مسئله مورد بررسی، توابع هزینه (توابع هدف) شامل زمان برخاست و درصد فراجش در نظر گرفته شده و به صورت زیر تعریف شده است.

$$y_1 = t_{rp} \quad (30)$$

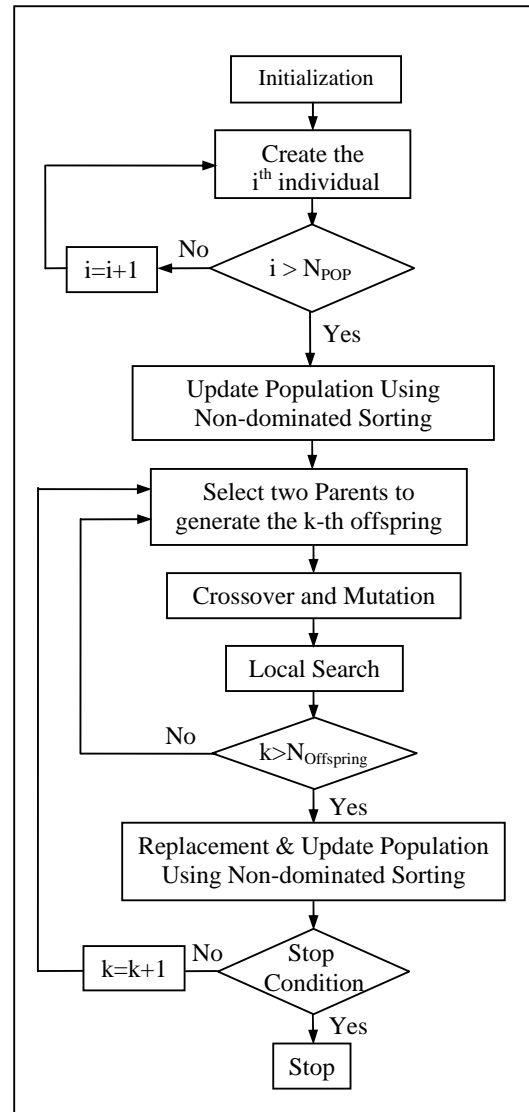
$$y_2 = \max(\%Os_p, \%Os_R) \quad (31)$$

در رابطه (۳۲)، $\%Os_p$ و $\%Os_R$ به ترتیب درصد فراجش حلقه کنترل کانال‌های رول و پیچ هستند.

متغیرهای طراحی هر یک از زیرسیستم‌های سیستم کنترل وضعیت و بازه‌های جستجوی در نظر گرفته شده برای هر یک از آن‌ها در جدول ۱۱ و همچنین قیود طراحی در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

نحوه استفاده از الگوریتم MARCOMA برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی سیستم کنترل وضعیت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای محاسبه توابع هزینه متناظر با هر یک از نقاط فضای جستجو از یک کُد تحلیلی استفاده می‌شود. کُد تحلیلی وظیفه دریافت مقادیر پیشنهادی پارامترهای طراحی از الگوریتم بهینه‌سازی، مقاداردهی پارامترهای پیش‌فرض، بررسی ارضای قیود، محاسبه پارامترهای وابسته، اجرای شبیه‌سازی پرواز شش‌درجه‌آزادی و در نهایت محاسبه توابع هزینه را به عهده دارد. الگوریتم بهینه‌سازی با فراخوانی مکرر کُد تحلیلی قادر است طرح‌های بهینه پرتو که همه قیود را ارضا می‌کنند، بدست آورد.

برای محاسبه توابع هزینه از شبیه‌سازی پرواز شش‌درجه‌آزادی غیرخطی استفاده می‌شود. به این منظور از روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده می‌شود. استفاده از شبیه‌سازی پرواز برای محاسبه توابع هزینه، امکان در نظر گرفتن اثر اشباع^{۲۸} سطوح کنترلی را نیز فراهم می‌کند. در این مقاله زاویه اشباع کانارد ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰- الگوریتم MARCOMA

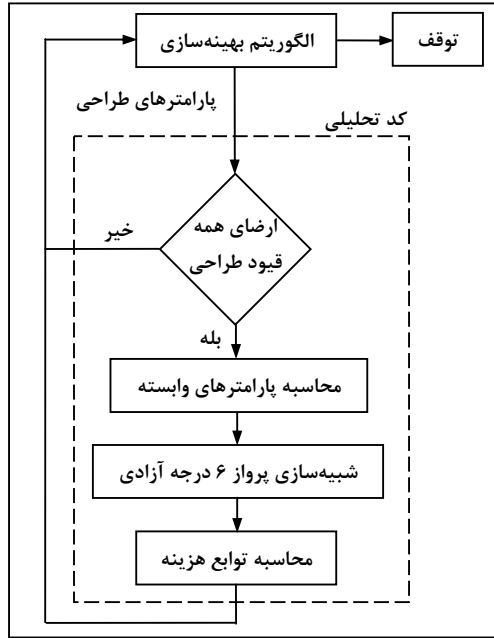
تعریف مسئله بهینه‌سازی سیستم کنترل وضعیت

در این بخش مسئله طراحی سیستم کنترل وضعیت به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود و سپس از الگوریتم بهینه‌سازی چندمنظوره MARCOMA برای رسیدن به طرح بهینه سیستم کنترل وضعیت استفاده خواهد شد. از آنجا که در مسائل بهینه‌سازی چندمنظوره نیاز به بهینه‌سازی همزمان چند تابع هدف وجود دارد، بنابراین استفاده از الگوریتم‌های چندمنظوره ضروری به نظر می‌رسد.

انتخاب صحیح توابع هدف، به تجربه طراح در طرح‌ریزی مسئله برمی‌گردد. با توجه به اینکه در وسیله پرنده مورد نظر موتور باید در اولین فرصت پس از پرتاب عمودی و چرخش

جدول ۱۱- متغیرهای طراحی و بازه جستجوی آن

متغیر طراحی	بازه جستجو		زیرسیستم
	حد بالا	حد پایین	
$\bar{t}_{C_{max}}$	۰.۲	۰.۱	بالک‌های
\bar{r}_{Hole}	۰.۵	۰.۱	کنترلی
\bar{l}_{Hing}	۰.۲	۰.۱	
$P_{C_{out}}$	۹۰	۵۰	مولد گاز
l_{GG}	۰.۱۵	۰.۱	خارجی
t_{bin}	۲۵	۱۲	مولد گاز
$P_{e_{in}}$	۱۲	۹	داخلی
$r_{GG_{in}}$	۰.۰۶	۰.۰۳	
\bar{l}_{TR}	۰.۴	۰.۰۵	عملگرهای
			کنترلی
t_{min}	۰.۲۵	۰.۱	
C_1	۰.۶	۰.۴	حلقه‌های
C_2	۴	۳	کنترلی
C_3	۵	۴	

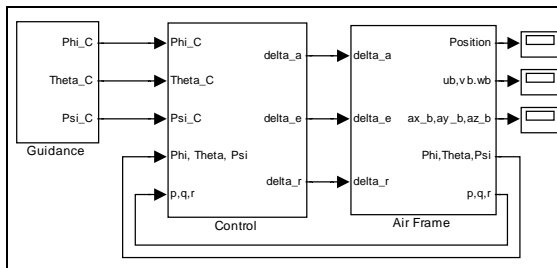


شکل ۱۱- فرآیند محاسباتی کد تحلیلی و نحوه فراخوانی آن توسط الگوریتم بهینه‌سازی

در شکل ۱۲ نحوه پیاده‌سازی شبیه‌سازی شش‌درجه‌آزادی شامل بلوک‌های هدایت، کنترل و ایرفریم نشان داده شده‌است. در بلوک هدایت، فرامین ورودی سیستم کنترل وضعیت و در بلوک کنترل، حلقه‌های کنترل رول، پیچ و یاو و همچنین حلقه سرو شبیه‌سازی شده‌است. در بلوک ایرفریم معادلات حرکت شش‌درجه‌آزادی مبتنی بر کواترنیون‌ها و همچنین نیروها و گشتاورهای ناشی از جاذبه، جت عکس‌عملی و نیز سیستم پرتاب سرد شبیه‌سازی شده‌است.

جدول ۱۲- قیود طراحی و محدودیت‌های آن

قیود سیستمی/کنترلی	بازه جستجو		زیرسیستم
	حد بالا	حد پایین	
$I_{SP_{out}}$	۲۱۰	۱۸۰	
\dot{I}_{out}	۱۲	۱۰	مولد گاز
$\frac{\delta_{w_{out}}}{r_{out} - r_{GG_{in}}}$	۰.۶	۰.۳	خارجی
$(A_{Port_{out}}/A_{t_{out}})$	-	۲	
$l_{P_{in}}$	۶	۴	مولد گاز
$I_{SP_{in}}$	۲۵۰	۲۲۰	داخلی
$(D_{Piston}/D_{Caliber})$	۰.۳	-	عملگرهای
α_S	۱۵	۱	
α_R	۱۰	۱	
α_P	۱۰	۱	حلقه‌های
K_{v_S}	-	۱۰	کنترلی
K_{a_R}	-	۱۰	
K_{a_P}	-	۱۰	



شکل ۱۲- مدل شبیه‌سازی شش‌درجه‌آزادی سیستم کنترل وضعیت در بالاترین سطح

نتایج بهینه‌سازی

در این بخش نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای طراحی زیرسیستم‌های کنترل وضعیت، که توسط الگوریتم بهینه‌سازی

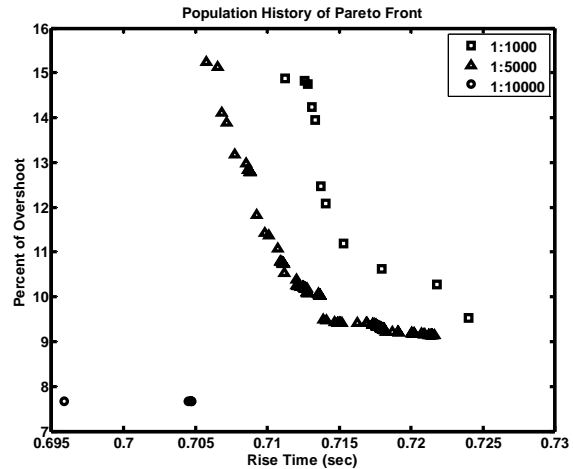
غیرخطی ارزیابی و با طراحی مبتنی بر سعی و خطا مقایسه شده‌است که نتایج آن در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده‌است. فرامین اعمالی در بلوک هدایت شامل، فرمان رول ۵ درجه، پیچ ۴۵ درجه و یاو ۰ درجه می‌باشد. ملاحظه می‌شود که عملکرد طراحی بهینه از طراحی مبتنی بر سعی و خطا هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بهتر است. در خصوص افزایش درصد فراجش کانال پیچ لازم به ذکر است که تابع هزینه دوم بیشترین درصد فراجش در دو کانال پیچ و رول را کمینه می‌کند و در این مسئله درصد فراجش کانال رول بیشتر از کانال پیچ بوده و الگوریتم بهینه‌سازی آن را نسبت به طراحی مبتنی بر سعی و خطا کاهش داده‌است.

جدول ۱۳- مقایسه متغیرهای طراحی بدست آمده از بهینه‌سازی با طراحی مبتنی بر سعی و خطا [۹]

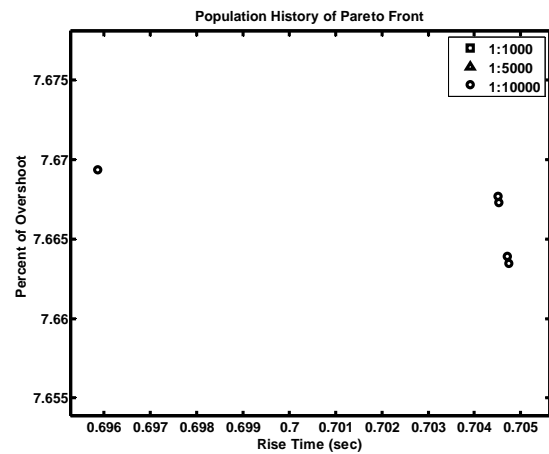
متغیر طراحی	طراحی مبتنی بر سعی و خطا	طراحی بهینه
$\bar{t}_{C_{max}}$	۰.۱	۰.۱۰۰۲
\bar{r}_{Hole}	۰.۲	۰.۴۵
\bar{l}_{Hing}	۰.۱	۰.۱۰۸۸
$P_{C_{in}} / P_{C_{out}}$	۰.۸۵۷	۰.۸
l_{GG}	۰.۱۳	۰.۱۴
$r_{GG_{in}}$	۰.۰۴	۰.۰۵۷۲
t_{bin}	۱۵	۱۷.۸۲
$P_{e_{in}} / P_{C_{in}}$	۰.۱۶۷	۰.۱۷۳۷۵
\bar{l}_{TR}	۰.۲	۰.۱۰۵۱
t_{min}	۰.۲	۰.۱۸۵۸
C_1	۰.۵	۰.۴۵
C_2	۴	۳.۹۸
C_3	۵	۴.۵

جدول ۱۴- مقایسه توابع هزینه طرح بدست آمده از بهینه‌سازی با طراحی مبتنی بر سعی و خطا [۹]

MARCOMA بدست آمده، ارائه شده و با نتایج طراحی مبتنی بر سعی و خطا [۸ و ۹] مقایسه شده‌است. روند تکامل جبهه پرتو پس از ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ بار فراخوانی گد تحلیلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. همچنین نقطه نهایی انتخاب شده به عنوان نقطه طراحی، در تصویر بزرگنمایی شده شکل ۱۴ نشان داده شده‌است

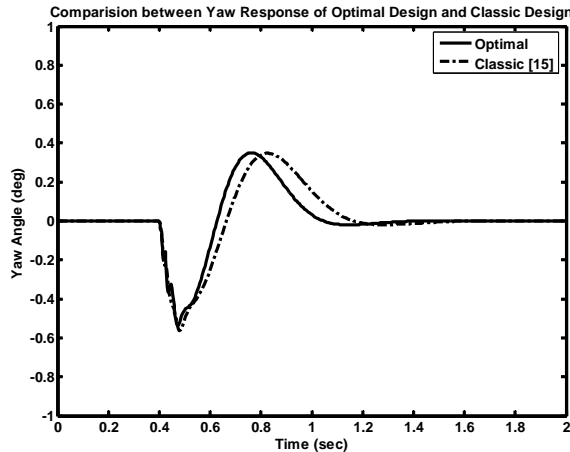


شکل ۱۳- نمودار تاریخچه تکامل جبهه پرتو



شکل ۱۴- نمودار بزرگنمایی شده تاریخچه تکامل جبهه پرتو

متغیرهای طراحی بدست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی و نیز توابع هزینه در جداول ۱۳ و ۱۴ آورده شده و با روش طراحی مبتنی بر سعی و خطا [۹] مقایسه شده‌است. همچنین عملکرد هر یک از حلقه‌های کنترلی طرح بدست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، با استفاده از شبیه‌سازی پرواز شش درجه آزادی



شکل ۱۷- تاریخچه زمانی تغییرات زاویه یاو در دو روش بهینه سازی و طراحی مبتنی بر سعی و خطا

با دقت در جدول ۱۴ مشاهده می شود که کاهش زمان برخاست حلقه های کنترلی منجر به افزایش پهناى باند سرو شده است که ناشی از در نظر نگرفتن قید برای پهناى باند حلقه سرو است. در عمل محدودیت هایی در ساخت سروهای با پهناى باند زیاد وجود دارد. بنابراین در ادامه سعی بر این خواهد بود که این موضوع نیز مورد توجه قرار گیرد. به این منظور طرح ریزی مسئله بهینه سازی به گونه ای اصلاح می شود که مسئله تا حد ممکن از هر جهت بسته شده باشد.

بهینه سازی با سه تابع هزینه

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، زمان برخاست حلقه پیچ با پهناى باند نسبت معکوس دارد. بنابراین الگوریتم بهینه سازی به سمت افزایش پهناى باند حلقه های کنترلی و در نتیجه افزایش پهناى باند حلقه سرو حرکت خواهد کرد که در این خصوص محدودیت های تکنولوژیکی وجود دارد. به همین دلیل حداقل کردن پهناى باند حلقه سرو نیز ضروری است. به این منظور تابع هزینه سومی به توابع هزینه قبلی اضافه خواهد شد، تا مسئله بهینه سازی به شکل مناسب تری طرح ریزی شود. پس در گام بعدی توابع هزینه به صورت زیر تعریف می شوند.

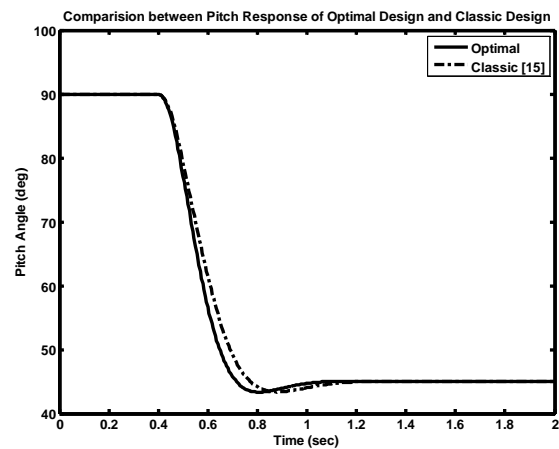
$$y_1 = t_{r_p} \quad (32)$$

$$y_2 = \max(\%Os_p, \%Os_R) \quad (33)$$

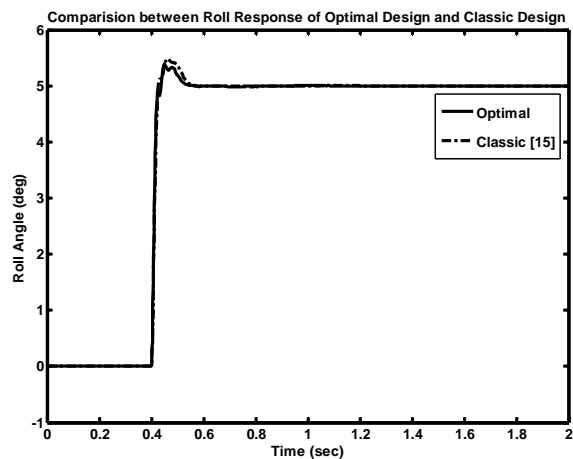
$$y_3 = \omega_{BW_s} \quad (34)$$

جبهه پرتو بدست آمده از بهینه سازی با سه تابع هزینه در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با توجه به سه بعدی بودن فضای عملکرد، انتخاب نقطه طراحی مناسب از بین مجموعه نقاط بهینه پرتو براحتی امکان پذیر نیست.

توابع هزینه	طراحی مبتنی بر سعی و خطا	طراحی بهینه
t_{r_p}	.	.
t_{s_p}	.	.
t_{r_R}	.	.
t_{s_R}	.	.
$\%Os_p$.	.
$\%Os_R$.	.
ω_{BW_s}	.	.



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی تغییرات زاویه پیچ در دو روش بهینه سازی و طراحی مبتنی بر سعی و خطا



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی تغییرات زاویه رول در دو روش بهینه سازی و طراحی مبتنی بر سعی و خطا

صحت بهینه‌گی طراحی مبتنی بر سعی و خطا را نیز نشان می‌دهد.

جدول ۱۶- مقایسه عملکرد طرح‌های بدست آمده از بهینه‌سازی با ۳ و ۲ تابع هزینه، با طراحی مبتنی بر سعی و خطا [۹]

توابع هزینه	طراحی بهینه	طراحی بهینه	طراحی مبتنی بر سعی و خطا
t_{Rp}	۰.۳۱۵۲	.	.
t_{Sp}	۰.۵۴۶۲	.	.
t_{Rr}	۰.۰۲۷۳	.	.
t_{SR}	۰.۱۱۹۲	.	.
%OS _p	۳.۶۷	.	.
%OS _R	۹.۱۸	.	.
ω_{BWs}	۴۲۷	.	.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از ارائه تاریخچه‌ای از بکارگیری سیستم‌های کنترل با جت عکس‌عملی در وسایل پرنده چرخان و غیرچرخان، به طراحی اولیه و بهینه‌سازی سیستم کنترل وضعیت با جت عکس‌عملی پیوسته در یک وسیله پرنده تاکتیکی در فاز چرخش سریع اولیه پس از پرتاب عمودی پرداخته شد. به این منظور ابتدا با تفکیک پارامترهای هر یک از اجزای سیستم کنترل وضعیت به سه دسته پارامتر پیش‌فرض، طراحی و وابسته، الگویی از فرآیند طراحی سیستم کنترل وضعیت شامل روند و ترتیب محاسبات زیرسیستم‌ها ارائه شد. سپس از الگوریتم ممتیک تطبیقی چندمنظوره MARCOMA برای بهینه‌سازی طراحی سیستم کنترل وضعیت بر اساس نتایج شبیه‌سازی پرواز شش‌درجه‌آزادی غیرخطی استفاده شد. فرآیند بهینه‌سازی ابتدا با در نظر گرفتن زمان برخاست و درصد فراجش به عنوان توابع هزینه انجام شد و نشان داده شد که می‌توان به نتایج بهتری نسبت به روش طراحی سنتی مبتنی بر سعی و خطا دست یافت. در نهایت نشان داده شد که اگر پهنای باند حلقه سرو نیز به عنوان تابع هزینه سوم مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شود، مسئله بهینه‌سازی از هر جهت بسته می‌شود و با مقادیر کمتر پهنای باند سرو نیز می‌توان به عملکرد بهتری نسبت به روش طراحی سنتی دست یافت.

بنابراین باید با کنار گذاشتن بخش‌هایی از جبهه پرتو که نامطلوب بودن آنها بدیهی است، تعداد نقاط را به حدی محدود کرد که انتخاب نقطه طراحی مناسب برای طراح تسهیل شود.

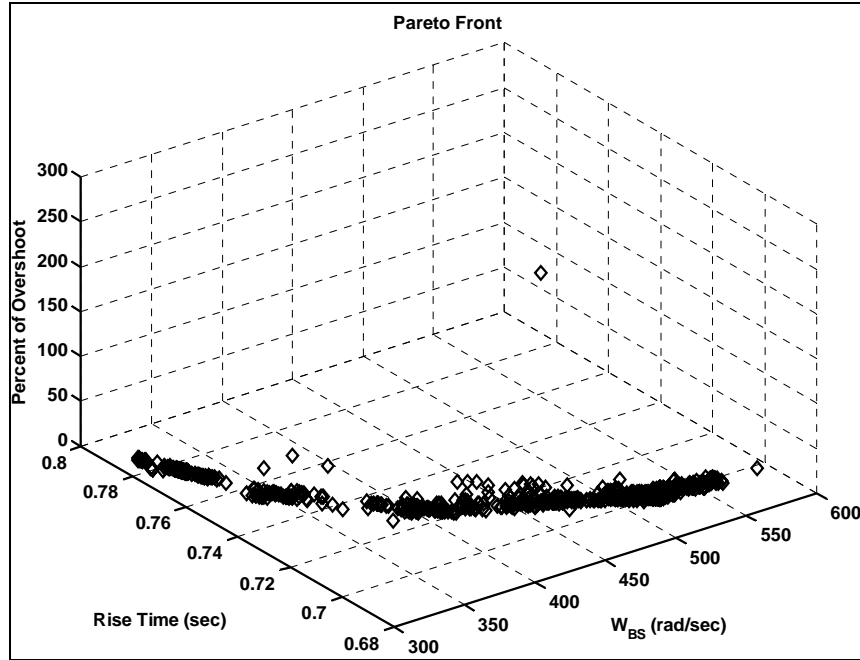
نمودار جبهه پرتو محدود شده به همراه نقطه طراحی انتخاب شده در شکل ۱۹ مشخص شده است. به منظور انتخاب آسانتر از بین نقاط شکل ۱۹، که همگی عملکرد نسبتاً مناسبی دارند، عملکرد کمی هر یک از این نقاط در جدول ۱۵ ارائه شده است. در این جدول نقطه طراحی نهایی انتخاب شده به صورت متمایز نشان داده شده است. همچنین طرح‌های بهینه شده با ۲ و ۳ تابع هزینه با طراحی مبتنی بر سعی و خطا مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۱۶ آورده شده است.

با توجه به جدول ۱۶ مشاهده می‌شود که عملکرد طراحی بهینه شده با ۲ و ۳ تابع هزینه از طراحی مبتنی بر سعی و خطا بهتر است. ضمن اینکه اگرچه عملکرد طرح بهینه بدست آمده با استفاده از دو و سه تابع هزینه تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد، ولی مشاهده می‌شود در حالتی که در تعریف مسئله بهینه‌سازی از سه تابع هزینه استفاده شده است، پهنای باند حلقه سرو ۴۶ رادیان بر ثانیه کاهش یافته است و نسبت به طراحی مبتنی بر سعی و خطا نیز کمتر شده است.

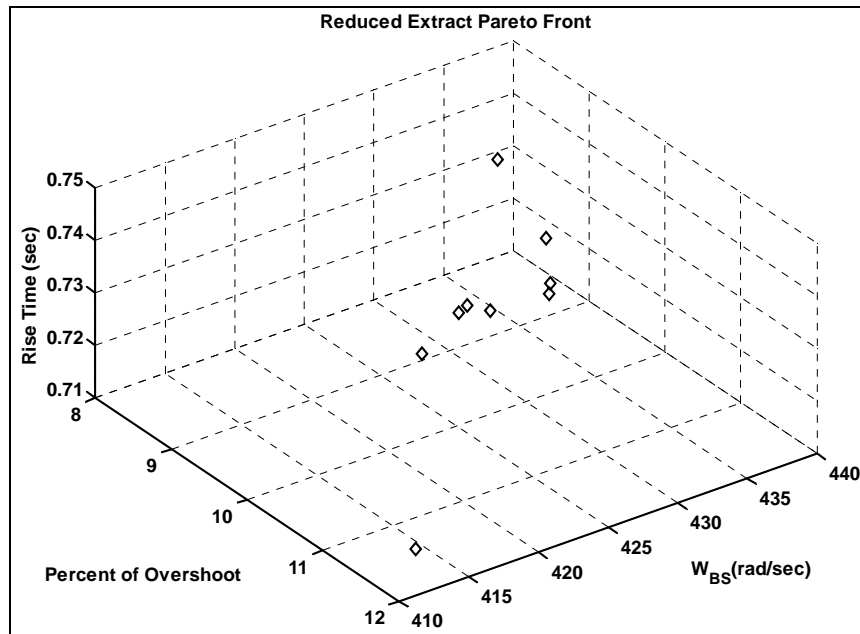
جدول ۱۵- نقاط طراحی انتخابی در بهینه‌سازی با سه تابع هزینه

پهنای باند حلقه سرو	ماکزیمم درصد فراجش	زمان برخاست حلقه پیچ
۴۱۲	۱۱.۸۵	۰.۳۱۷۹
۴۳۸	۸.۱۶	۰.۳۳۲
۴۳۸	۸.۸۵	۰.۳۱۵۲
۴۳۲	۹.۱۶	۰.۳۱۸۶
۴۳۹	۸.۶۱	۰.۳۲۰۵
۴۲۷	۹.۱۸	۰.۳۱۵۲
۴۳۰	۹.۱۲	۰.۳۱۹۶
۴۳۱	۹.۰۴	۰.۳۱۹۴
۴۳۷	۹.۰۲	۰.۳۱۵۸

نکته دیگر که باید به آن توجه کرد، این است که نزدیکی مقادیر عددی توابع هزینه طراحی بهینه و طراحی مبتنی بر سعی و خطا، نشان می‌دهد که طراحی مبتنی بر سعی و خطا نیز نسبتاً خوب انجام شده است. با این وجود، انجام بهینه‌سازی، علاوه بر بهبود نسبی عملکرد سیستم، اطمینان از



شکل ۱۸- جبهه پرتو بدست آمده در بهینه‌سازی با سه تابع هزینه



شکل ۱۹- جبهه پرتو محدودشده به همراه نقطه انتخاب شده به عنوان طرح نهایی

پی‌نوشت:

Reaction Jet Control
Strategic Defense Initiative
Intercontinental Ballistic Missile
Trajectory Tracking
Direct Fire Atmospheric Rocket
Memetic Algorithms
Adaptive Real-coded Memetic Algorithm
Steady-State Genetic Algorithm
Continuous Ant Colony System
Multi-objective Adaptive Real-Coded Memetic
Algorithm
Hinge Moment
Skid to Turn
Negative Assortative Mating
Roulette Wheel
Diversity
Nun-uniform mutation
Replace Worst Strategy
Replacement
Ranking
Special Session of the IEEE Congress on
Evolutionary Computation in 2005
Pareto Optimality
Non-dominated Sorting
Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
Crowding Distance Assignment
Simple Multi-objective Particle Swarm Optimizer
Pareto Archive Evolution Strategy
Multi-Objective Genetic Algorithm2
Saturation

منابع و مراجع

- [1] Champigny, P. and Lacau, R. G.; "Lateral Jet Control For Tactical Missiles", *Missile Aerodynamics*, Presented at an AGARD Special Course, pp. 3.1-3.57, June 1994.
- [2] Thurman, S. W. and Flashner, H.; "Robust Digital Autopilot Design for Spacecraft Equipped With Pulse-Operated Thrusters", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 5, p.p. 1047-1055, September-October 1996.
- [3] Lynch, K. M.; "Controllability of a Planar Body With Unilateral Thrusters", *IEEE, Transactions on Automatic Control*, Vol. 44, No. 6, p.p. 1206-1211, June 1999.
- [4] Hyochoong B., Youngwoong P. and Jungyoup H.; "Feedback Control For Slew Maneuver Using On-Off Thrusters", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Korea Aerospace Research Institute, Vol. 22, No. 6, p.p. 816-822, November-December 1999.
- [5] Hall, R. A., Lowry, N.C. and Ghorbel, Fathi. "Three-Pulse Minimal Fuel Rotations of Axisymmetric Spacecraft Using Reaction Control Thrusters", *IEEE American Control Conference*, p.p. 1128-1133, June 2003.
- [6] Xin Yin, Young, Yang, Ming and Wang, Zicai.; "Research on Control Method for Lateral Thrust Based on Interceptor in Atmosphere", *IMACS Multi-conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA)*, Control & Simulation Center, p.p. 713-716, October 2006.
- [7] Ridgely, D. Brett, Drake, David, Triplett, Louis and Geise, Cory; "Dynamic Control Allocation of a Missile with Tails and Reaction Jets", *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2007-6671, p.p. 1-32, August 2007.
- [۸] بندی‌کناری، حمید؛ " پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، استاد راهنما: دکتر هادی نوبهاری، استاد مشاور: دکتر علیرضا باصحبت نوین‌زاده، دانشکده هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، بهمن ۱۳۸۸.
- [۹] نوبهاری، هادی؛ باصحبت نوین‌زاده، علیرضا؛ بندی‌کناری، حمید؛ " مجله علمی و پژوهشی هوافضا؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات؛ آذر ۱۳۸۹.
- [۱۰] داود دارابی، " پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، استاد راهنما: دکتر هادی نوبهاری، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، دی ۱۳۸۸.
- [11] Lozano M., Herrera F., Krasnogor N., Molina D., "Real-Coded Memetic Algorithms with Crossover Hill-Climbing", *Evolutionary Computation Volume 12*, Number 3, 2004.
- [12] Molina D., Herrera F., and Lozano M., "Adaptive Local Search Parameters for Real-coded Memetic Algorithm", *Proceeding of the 2005 IEEE congress on Evolutionary Computation*, p.p 888-895, 2005.
- [13] Nobahari H., Darabi D., "A New Adaptive Real-coded Memetic Algorithm", International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, *IEEE Computer Society*, 2009.
- [14] Pourtakdoust S. H., Nobahari H., "An Extension of Ant Colony System to Continuous Optimization Problems", *Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3172. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg Germany*, 294-301, 2004.
- [15] Shannon Land M.W., "Evolutionary Algorithms

May 2005.

[19] Srinivas, N. and Deb, K. "Multi-Objective Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms, *Evolutionary Computation*, 2(3):221-248, 1995.

[20] Kalianmoy D., Agrawal S. and et al, "A Fast Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization NSGA-II", *KanGAL Report No. 200001*, 1999.

with Local Search for Combinational Optimization", PhD thesis, *Univ. California*, San Diego, 1998.

[16] Fernandes C., Rosa A., "A Study of Non-random Matching and Varying Population Size in Genetic Algorithm Using a Royal Road Function", *Proceeding of the 2001 congress on Evolutionary Computation*, 60-66, 2001.

[17] Sinha A., "Designing Efficient Genetic and Evolutionary Algorithm Hybrid", PhD thesis, *Indian Institute of Technology, Kharagpur*, 1999.

[18] Suganthan P.N., Hansen N., et al, "Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2005 Special Session on Real-Parameter Optimization", *Technical report, Nanyang Technological University*,