مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۱۶، ص‌ص ۱۷۰-۱۸۰

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهینه‌سازی پارتویی گسسته-پیوسته‌ی گیربکس اصلی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D

فرید وکیلی تهامی[1*]، رضا حسن‌نژاد قدیم[2]، اکبر رسولیان[3]

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

*تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۶۶، f_vakili@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ فروردین ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۹ خرداد ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

گیربکس هلیکوپتر

خستگی

وزن

بهینه‌سازی چندهدفه‌ی گسسته-پیوسته‌ی

جبهه‌ی پارتو

چکیده

امروزه بهینه‌سازی یکی از موضوعات مهم در علوم مهندسی و صنعت بوده و برای رقابت در عرصه‌ی طراحی و تولید، استفاده از این روش در طراحی تمامی قطعات مکانیکی امری حیاتی است. از این رو می‌بایست به‌دنبال طرحی بهینه بود که در عین سادگی، امکان تولید داشته باشد. در صنایع هوافضا دو مسئله‌ی وزن و عمر قطعات بسیار حائز اهمیت هستند و از آنجایی‌که گیربکس یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در سیستم پیشرانه‌ی هلیکوپتر می‌باشد مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن و اطمینان از استحکام خستگی آن از اهمیت دوچندان برخوردار می‌شود. طرح‌های موجود بیشتر برمبنای یکی از این اهداف ارائه شده‌اند اما در واقع طرحی بهینه خواهد بود که هدف‌های مختلف را دربر گیرد. از این‌رو در این مقاله، مقادیر مناسب پارامترهای طراحی شامل مدول عمودی و عرض چرخدنده‌های گیربکس اصلی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه‌ی گسسته-پیوسته‌ی ترکیبی در جهت طراحی بهینه‌ی گیربکس از نظر کاهش وزن، افزایش ضریب اطمینان کمینه و کاهش اختلاف ضرایب اطمینان بیشینه و کمینه‌ی مجموعه‌ی چرخدنده‌ها تعیین شده و در نهایت نیز نتایج با طرح تولیدشده توسط سیکورسکی مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در بهینه‌سازی تک‌هدفه حاکی از کاهش ۲۷/۲۴ درصدی جرم چرخدنده‌های طرح بهینه در مقایسه با گیربکس صنعتی به‌کاررفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D می‌باشند. نتایج بهینه‌سازی‌های دوهدفه و سه‌هدفه نیز به‌صورت جبهه‌ی پارتو ارائه و جواب‌هایی با حالت‌های حدی به‌عنوان نمونه آورده شده‌اند.

Pareto discrete- continuous optimization of Sikorsky ASH-3D helicopter main gearbox

Farid Vakili-Tahami[1*], Reza Hassannejad Qadim[1], Akbar Rasoulian[1]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
*P.O.B. 5166614766 Tabriz, Iran, f_vakili@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 April 2014
Accepted 09 June 2014
Available Online 08 November 2014

Keywords:
Helicopter Gearbox
Fatigue
Weight
Discrete- Continuous Multi-Objective Optimization
Pareto Front

ABSTRACT

Nowadays, optimization is becoming one of the most important techniques in engineering and industry to provide competing products in design and manufacturing. Therefore, it is necessary to search for optimum designs with productibility. In aerospace industry reducing weight and improving the reliability of products are major concerns. Regarding the gearbox one of the most important parts in the helicopter propulsion system, these objects should be considered further. However, most of the existing designs consider only one object, hence, it is vital to implement optimization techniques to include different objectives to improve the existing designs and provide optimum products. In this paper, optimum design parameters including module and face width of gears for the main gearbox of Sikorsky ASH-3D helicopter have been determined (modified) using single and multi-objective mixed discrete- continuous optimization method to minimize weight of the gearbox, increase the safety factor and reduce the difference between safety factors of different gears. The results show that the weight of the gears can be reduced by 27.24% compared with the existing gearbox. The results of the multiobjective optimization have also been presented as Pareto front diagram which can be used by manufacturers to satisfy the preferred requirements.

۱- مقدمه

در زمینه‌ی علوم مهندسی و صنایع کاربردی می‌بایست در میان طرح‌های مختلف به‌دنبال طرحی بهینه با هزینه‌ی کمتر و بازده بالاتر بود که امکان تولید نیز داشته باشد. با توسعه‌ی گستره‌ی ارتباطات و الزام افزایش سرعت در جابه‌جایی‌ها، کاربرد وسایل نقلیه‌ی سریع هم‌چون هواپیماها و هلیکوپترها افزایش چشم‌گیری یافته است. در این میان، توسعه‌ی هلیکوپترها به‌دلیل کاربردهای استراتژیک و امکان فرود آن‌ها در اماکن مختلف، سرعت بیشتری داشته است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Vakili-Tahami, R. Hassannejad Qadim, A. Rasoulian, Pareto discrete- continuous optimization of Sikorsky ASH-3D helicopter main gearbox, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 170-180, 2015 (In Persian)

از میان سیستم‌های مختلف موجود در یک هلیکوپتر، گیربکس اصلی که وظیفه‌ی انتقال دور خروجی موتور به ملخ اصلی را بر عهده دارد از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. یکی از مهم‌ترین دلایل کاربرد گیربکس در هلیکوپتر، کاهش نسبتاً زیاد دور موتور (نسبت دور موتور به دور ملخ اصلی حدود ۱۰ تا ۱۰۰ در مدل‌های مختلف) به‌منظور افزایش گشتاور انتقالی به ملخ اصلی، جلوگیری از آسیب نوک ملخ و کاهش صدای آن می‌باشد.

در صنایع هوافضا، وزن و عمر قطعات بسیار حائز اهمیت می‌باشند و از آنجایی‌که گیربکس یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در سیستم پیشرانه‌ی هلیکوپتر بوده و در وزن سامانه نیز سهم به‌سزایی دارد، بهینه‌سازی وزن یا جرم و خستگی اجزای آن از اهمیت دوچندان برخوردار می‌شود. کاهش وزن در صنایع هوافضا از دو جنبه‌ی مختلف موردتوجه قرار می‌گیرد؛ جنبه‌ی اول اینکه با کاهش وزن، مقدار ماده‌ی مصرفی و در نتیجه هزینه‌ی مواد اولیه کاهش می‌یابد و از طرف دیگر، مقدار مصرف سوخت نیز کاهش می‌یابد که این امر علاوه بر کاهش هزینه‌ی سوخت، باتوجه به محدودیت‌های موجود در زمینه‌ی تولید این سوخت‌ها و مسائل استراتژیکی، مدنظر طراحان و سازندگان هواپیماها و هلیکوپترها قرار دارد. خستگی و افزایش عمر قطعات نیز باتوجه به هزینه‌ی ساخت و یا تعمیر آن‌ها حائز اهمیت است؛ به‌صورتی که با افزایش عمر قطعات از میزان تعمیرات و تعویض قطعات و تأخیرهای بوجودآمده کاسته می‌شود.

کار در زمینه‌ی بهینه‌سازی گیربکس و چرخدنده نسبتاً جدید و نوپا می‌باشد. از اولین پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، مطالعات آنجانویچ [۱] در سال ۱۹۹۶ میلادی می‌باشد که ساختاری را برای چگونگی تصمیم‌گیری در طراحی گیربکس‌ها برمبنای روابط حاکم بر مسئله ارائه کرده است. ساختار ارائه‌شده به‌صورت یک برنامه‌ی کامپیوتری بوده و به تصمیم‌گیری‌های سودمند در طراحی گیربکس‌ها منجر شده است. این برنامه امکان بهینه‌سازی‌تابع هدف حجم را با قیودی همچون خستگی و نسبت دنده‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی ریاضی فراهم کرده و جوابی مناسب و نزدیک به حل تحلیلی ارائه می‌نمود؛ علاوه بر آن در مواردی هم که حل تحلیلی ممکن نبود، طرحی بهینه برمبنای پارامترهای طراحی مسئله پیشنهاد می‌شد. یاکوتا و همکارانش [۲] در سال ۱۹۹۸ میلادی روش حلی به‌منظور دستیابی به وزن بهینه‌ی چرخدنده ارائه نموده‌اند. آنان در پژوهش خود به فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی تک‌هدفه‌ی وزن چرخدنده با استفاده از الگوریتم ژنتیکی پرداخته‌اند. تامسون و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۰ میلادی به بهینه‌سازی چندهدفه‌ی گیربکس‌های کاهنده با چرخدنده‌های ساده پرداخته‌اند. در این پژوهش یک فرمول‌بندی بهینه‌ی چندهدفه برای گیربکس‌های کاهنده ارائه شده است که امکان کاربرد در مسائل بهینه‌سازی مختلف را داشته باشد. این فرمول‌بندی در طراحی گیربکس‌های کاهنده‌ی دومرحله‌ای یا سه‌مرحله‌ای تحت شرایط بارگذاری و معیارهای طراحی یکسان به‌کار برده شده است و امکان توسعه‌ی فرایندهای طراحی سنتی با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه‌ی بنیادی ضمن در نظر گرفتن مصالحه‌ی میان عمر خستگی سطحی و مقدار حجم کمینه را فراهم می‌آورد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که برای شرایط بارگذاری یکسان، گیربکس کاهنده‌ی سه‌مرحله‌ای چه از نظر حجم و چه از نظر عمر خستگی سطحی نسبت به گیربکس کاهنده‌ی دو مرحله‌ای بهینه‌تر می‌باشد. مارسلین [۴] در سال ۲۰۰۱ میلادی به بررسی امکان استفاده از روش الگوریتم ژنتیکی و روش انتخاب جریمه برای طراحی بهینه‌ی چرخدنده‌ها پرداخته است. طراحی بهینه به‌صورت چندهدفه و با توابع هدف وزن چرخدنده‌ها، خطای انتقال قدرت و فاصله‌ی بین محوری صورت گرفته است. در بخش دیگری از این پژوهش نیز مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از ضرایب وزنی به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تک‌هدفه با تابع هدف وزن تبدیل و سپس حل شده است. نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای طراحی ارائه‌شده توسط الگوریتم ژنتیکی نسبت به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هندسی بهینه‌تر می‌باشند. ساوسانی و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۰ میلادی به بهینه‌سازی یک گیربکس با چرخدنده‌های ساده با استفاده از دو روش الگوریتم ازدحام ذرات[1] و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[2] پرداخته‌اند. هدف اصلی آنان در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای مختلف طراحی به‌منظور دستیابی به طرح بهینه از نظر وزن بوده است. طرح درنظر گرفته‌شده از سوی آن‌ها تنها شامل یک جفت چرخدنده‌ی ساده‌ی درگیر بوده و بهینه‌سازی صورت‌گرفته نیز به‌صورت تک‌هدفه می‌باشد. ساوسانی و همکارانش برای اعمال قیود مختلف مسئله همچون مقاومت خستگی خمشی و تماسی و فاصله‌ی بین محوری بر روی تابع هدف وزن از محدوده‌ی قیود ارائه‌شده توسط یاکوتا و همکارانش بهره برده‌اند. آنان ابتدا مدل بهینه‌سازی یاکوتا و همکارانش را با استفاده از معادلات استاندارد آگما[3] بهبود بخشیده و سپس مسئله را حل کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که مدل بهبودیافته نسبت به مدل یاکوتا و همکارانش، جواب‌های بهینه‌تری به‌دست می‌دهد. به‌علاوه هرچند جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید تقریباً مشابه هم بوده‌اند اما الگوریتم ازدحام ذرات با تعداد تکرار کمتری مسئله را حل کرده و در نتیجه سرعت همگرایی بیشتری داشته است. سینگ و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۲ میلادی به بهینه‌سازی فرایند طراحی یک چرخدنده‌ی داخلی ساده‌ی درگیر با یک چرخدنده‌ی ساده‌ی خارجی، با استفاده از الگوریتم ژنتیکی پرداختند. تابع هدف در نظر گرفته‌شده توسط آنان فاصله‌ی بین محوری دو چرخدنده بود که رابطه‌ای مستقیم با وزن چرخدنده‌ها داشت به این‌صورت که با کمینه‌سازی تابع هدف مسئله، وزن چرخدنده‌ها نیز در عمل کاهش می‌یافت. نتایج پژوهش بیانگر این موضوع بود که با پارامترهای طراحی مشابه، فاصله‌ی بین محوری به‌دست‌آمده از روش الگوریتم ژنتیکی در مقایسه با پژوهش‌های صورت‌گرفته‌ی قبلی کاهش یافته است. با کاهش فاصله‌ی بین محوری، قطر گام دو چرخدنده نیز کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش وزن جفت چرخدنده‌ی درگیر شده است. سوانتنر و کمبل [۷] در سال ۲۰۱۲ میلادی بهینه‌سازی گیربکس‌های شامل چرخدنده‌های ساده، مخروطی و حلزونی را ارائه کرده‌اند. فرایند جستجو، ترکیبی از تغییرات هندسی، انتخاب متغیر گسسته و بهینه‌سازی متغیر پیوسته را دربر می‌گرفت. در این پژوهش تابع هدف به‌صورت ترکیب خطی جرم و راندمان چرخدنده‌ها درنظر گرفته شده بود که با استفاده از بهینه‌سازی هندسی دنده‌های چرخدنده به‌دنبال یافتن راه‌هایی برای ساختن چرخدنده‌های کوچکتر و سبکتر بود. در پژوهش مذکور تمامی پیکربندی‌های ممکن برای انواع چرخدنده‌های ساده، مخروطی و حلزونی مورد جستجو قرار گرفته و جواب بهینه‌ی مسئله به‌دست آمده است. گلابی و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۴ میلادی به بهینه‌سازی تک‌هدفه‌ی یک گیربکس چندمرحله‌ای بر مبنای کمینه‌سازی حجم پرداخته‌اند. در این پژوهش تعداد مراحل گیربکس متغیر در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه گیربکس تک‌مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و یا سه مرحله‌ای باشد با استفاده از بخش جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب[4] به کمینه‌سازی حجم آن پرداخته شده است. در نهایت نیز با انتخاب مقادیر مختلفی از توان ورودی، نسبت دنده و سختی سطحی، نمودارهای کاربردی از نتایج بهینه‌سازی ارائه شده است.

1- Particle Swarm Optimization
2- Simulated Annealing
3- American Gear Manufacturers Association (AGMA)
4- MATLAB

نمودارهای کاربردی به‌گونه‌ای رسم شده‌اند که تمامی پارامترهای موردنیاز همچون تعداد مراحل گیربکس، مدول و عرض چرخدنده‌ها را در اختیار مخاطب قرار می‌دهند.

علی‌رغم استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی چرخدنده‌ها، همچنان نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتر در طراحی گیربکس‌های صنعتی به‌خصوص گیربکس هلیکوپتر احساس می‌شود؛ به‌همین دلیل هدف اصلی در مقاله‌ی حاضر، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به‌منظور طراحی بهینه‌ی گیربکس هلیکوپتر با کاربرد صنعتی می‌باشد. از طرف دیگر سیستم گیربکس هلیکوپتر دارای انواع چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی است و به‌دلیل تفاوت در رفتار خستگی آنها، استفاده از روش‌های چندهدفه به منظور ارائه‌ی طرح بهینه ضروری می‌باشد.

در پژوهش حاضر به طراحی بهینه‌ی گیربکس اصلی هلیکوپتر ASH-3D با تمرکز بر طراحی بهینه‌ی چرخدنده‌ها پرداخته شده است. بدین منظور، با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیکی با متغیرهای گسسته- پیوسته‌ی ترکیبی[1] با مرتب‌سازی بر اساس داده‌های نامغلوب[2]، به بهینه‌سازی طرح موجود به‌صورت تک‌هدفه، دوهدفه و سه‌هدفه با اهداف کاهش جرم چرخدنده‌ها، افزایش ضریب اطمینان کمینه و کاهش اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه‌ی مجموعه‌ی چرخدنده‌ها پرداخته شده است. برای محاسبه‌ی ضرایب اطمینان چرخدنده‌ها، از روابط خستگی خمشی و تماسی ارائه‌شده برای چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی در استانداردهای آگما ۲۰۰۱[3] و آگما ۲۰۰۵[4] و[۹،۱۰] استفاده شده که جزئیات بیشتر در بخش "محاسبات طراحی چرخدنده‌هابر اساس استاندارد آگما" آمده است. استانداردهای مذکور دو عامل مهم واماندگی چرخدنده‌های صنعتی یعنی کندگی ناشی از تنش‌های تماس سطحی و خستگی ناشی از لنگر خمشی را مورد بحث قرار می‌دهند. این مؤسسه از سال ۱۹۱۶ میلادی شروع به تدوین استانداردهای مختلف در این زمینه نموده است که در محافل علمی و صنعتی کشورمان نیز مورد استفاده می‌باشند. پارامترهای طراحی موردنظر در این پژوهش مدول عمودی و عرض چرخدنده‌ها می‌باشند که در این بین، عرض چرخدنده پارامتری با مقدار پیوسته بوده و مدول عمودی از مجموعه‌ی مرجع مدول‌های استاندارد انتخاب شده و از این‌رو متغیری گسسته محسوب می‌گردد؛ در نتیجه از الگوریتم ژنتیکی با متغیرهای گسسته-پیوسته‌ی ترکیبی برای بهینه‌سازی مسئله استفاده می‌شود.

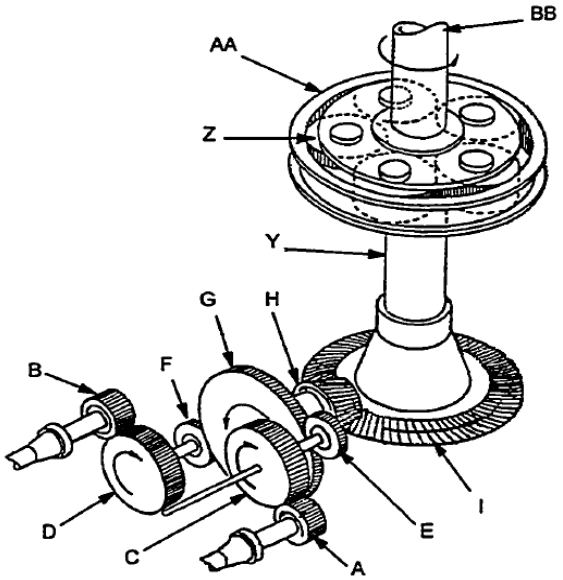
۲- مشخصات مسئله

گیربکس اصلی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D[5] در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. قدرت پیشرانه‌ی هلیکوپتر ASH-3D توسط دو موتور توربین گازی از نوع General Electric T58-GE-10 تأمین می‌شود که هریک دارای توانی برابر با ۱۴۰۰ اسب بخار (توان کل برابر با ۲۸۰۰ اسب بخار) می‌باشند. دور موتور ورودی به گیربکس اصلی (چرخدنده‌های A و B در شکل ۱) برابر با ۱۸۹۶۶ دور در دقیقه و دور خروجی از گیربکس که همان دور ملخ اصلی (شفت BB در شکل ۱) است، برابر با ۲۰۳ دور در دقیقه می‌باشد [۱۱].

به‌دلیل نسبت تغییر دور قابل ملاحظه‌ی حدود ۹۴ برابری، سیستم گیربکس این هلیکوپتر از پیچیدگی و اهمیت خاصی برخوردار است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این گیربکس از اجتماع تعدادی چرخدنده تشکیل یافته اما در آن به‌ناچار از چرخدنده‌ی مخروطی برای تغییر راستای دوران افقی موتور به دوران عمودی ملخ اصلی استفاده شده است. علاوه بر آن، سیستم چرخدنده‌ی خورشیدی نیز در گیربکس هلیکوپتر به‌کار می‌رود. مشخصات هندسی چرخدنده‌های گیربکس در جدول ۱ آمده است. البته بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهند که رفتار خستگی چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی با یکدیگر متفاوت بوده و به‌همین دلیل بهینه‌سازی‌هایی که همزمان شامل هر دو نوع آنها هستند پیچیده‌تر می‌باشند.

۳- بهینه‌سازی چندهدفه

به‌طور معمول، طراحی مهندسی شامل مجموعه‌ای از اهداف و معیارهاست. در صورت تضاد اهداف، جواب بهینه‌ی یکتا برای بهینه‌سازی وجود نداشته و حل مسئله مستلزم استفاده از روش‌های چندهدفه می‌باشد. شکل کلی مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود [۱۲]:



شکل ۱ طرح شماتیک گیربکس اصلی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D [۱۱]

جدول ۱ مشخصات هندسی چرخدنده‌های گیربکس موجود هلیکوپتر ASH-3D (نام‌گذاری چرخدنده‌ها مطابق شکل ۱) [۱۱]

چرخدنده	نوع	تعداد دنده
A و B	مارپیچ*	۴۱
C و D	مارپیچ	۹۶
E و F	مارپیچ	۴۳
G	مارپیچ	۱۰۹
H	مخروطی مارپیچ	۲۵
I	مخروطی مارپیچ	۸۵
Y	مارپیچ	۵۴
Z	مارپیچ	۷۱
AA	مارپیچ	۱۹۶

(*) چرخدنده‌های مارپیچ شامل چرخدنده‌های ساده نیز می‌شوند.

1- Mixed discrete- continuous genetic algorithm
2- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)
3- AGMA 2001-D04
4- ANSI/AGMA 2005-D03
5- Sikorsky ASH-3D

$$\begin{aligned}
&\text{minimize } J(x,p)=[\,J_1,\ldots,J_n]\\
&\text{subject to } h(x,p)=0\\
&\qquad g(x,p)\le 0\\
&x_{i,LB}\le x_i\le x_{i,UB}\quad (i=1,\ldots,m)\\
&x=[x_1,\ldots,x_i,\ldots,x_m]\\
&h=[h_1(x),\ldots,h_{r1}(x)]\\
&g=[g_1(x),\ldots,g_{r2}(x)]
\end{aligned}\tag{۱}$$

که در این روابط J، x، p و n به‌ترتیب بردار توابع هدف، بردار متغیرهای طراحی، بردار ثوابت و تعداد اهداف می‌باشند و هر متغیر طراحی بین دو مقدار حد پایین ($x_{i,LB}$) و حد بالا ($x_{i,UB}$) محدود شده است. بهینه‌سازی ممکن است شامل دسته‌ای از قیود تساوی (h) و نامساوی (g) باشد. در این روابط r_1 و r_2 به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد قیود تساوی و نامساوی می‌باشند.

۱-۳- الگوریتم ژنتیکی چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

در این بررسی، مسئله با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب حل شده است. الگوریتم ژنتیکی یک روش جستجو و بهینه‌سازی بر پایه‌ی انتخاب طبیعی است که جمعیت داده‌ها را تحت قانون انتخابی مشخصی بهبود می‌دهد. در این بررسی برای بهینه‌سازی تک‌هدفه از الگوریتم ژنتیکی تک‌هدفه‌ی گسسته- پیوسته و برای بهینه‌سازی چندهدفه از الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب با متغیرهای طراحی گسسته- پیوسته استفاده شده است. برای بهینه‌سازی با این الگوریتم ابتدا با توجه به دامنه‌ی طراحی، یک جمعیت اولیه از متغیرهای طراحی تولید می‌شود. پس از کدگشایی داده‌ها با توجه به مجموعه‌ی مرجع متغیرهای طراحی گسسته و پیوسته، مقدار توابع هدف به‌ازای جمعیت موجود محاسبه می‌شود. با توجه به انجام بهینه‌سازی گسسته-پیوسته‌ی ترکیبی، این‌کار در مورد متغیرهای گسسته و پیوسته با دو روش متفاوت انجام می‌گیرد. در مورد متغیرهای پیوسته، با در نظر گرفتن محدوده‌ی متغیرهای طراحی و مفهوم گسسته‌سازی، فضای پیوسته به مجموعه‌ای از پله‌های گسسته تبدیل می‌شود. با گسسته‌سازی، محدوده‌ی طراحی پیوسته به زیردامنه‌های بدون اشتراک گسسته تقسیم و به هر یک از زیردامنه‌ها، یک مقدار گسسته‌ی منحصربه‌فرد واگذار می‌شود. اختلاف بین مقادیر تابع حقیقی و مرحله‌ی گسسته‌سازی با عنوان خطای گسسته‌سازی شناخته می‌شود. گسسته‌سازی با نمونه‌برداری از یک تابع و جانشانی نمونه‌ها در سطوح گسسته‌سازی معادل آغاز می‌گردد. هر نمونه‌ای که در یکی از سطوح گسسته‌سازی قرار می‌گیرد ممکن است مقداری برابر میانگین، بیشینه و یا کمینه‌ی آن سطح را اختیار کند. به‌طور کلی واگذاری مقدار میانگین برای نمونه‌های هر سطح ترجیح داده می‌شود؛ چراکه بیشینه‌ی خطا در این حالت برابر با نصف محدوده‌ی سطح موردنظر بوده و این درحالی است که گردکردن مقدار نمونه به مقادیر بیشینه یا کمینه‌ی سطح، خطای گسسته‌سازی را تا اندازه‌ی کل محدوده‌ی سطح افزایش می‌دهد. کدگذاری متغیرهای پیوسته با روابط (۲) و (۳) انجام می‌شود [۱۳]:

$$x_{\text{norm}}=\frac{\bar{x}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}\tag{۲}$$

$$\text{gene}\,[m]=\text{round}\left\{x_{\text{norm}}-2^{-m}-\left(\sum_{x=1}^{m-1}\text{gene}\,[x]\times 2^{-x}\right)\right\}\tag{۳}$$

که در آنها x_{norm} متغیر بی‌بعد (بین صفر و یک)، $\bar{x}$ متغیر حقیقی، $x_{\min}$ مقدار کمینه‌ی متغیرها، $x_{\max}$ مقدار بیشینه‌ی متغیرها، gene$[m]$ فرم دودویی $\bar{x}$ و round{} تابع تقریب به نزدیک‌ترین عدد صحیح می‌باشند. همچنین برای کدگشایی متغیرها از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۱۳]:

$$x_{\text{quant}}=\left(\sum_{m=1}^{N_{\text{gene}}}\text{gene}\,[m]\times 2^{-m}\right)+2^{-(M+1)}\tag{۴}$$

$$\zeta_n=x_{\text{quant}}(x_{\max}-x_{\min})+x_{\min}\tag{۵}$$

در روابط (۴) و (۵) x_{quant} فرم گسسته‌سازی‌شده‌ی x_{norm} و ζ_n فرم گسسته‌سازی‌شده‌ی $\bar{x}$ می‌باشند.

الگوریتم ژنتیکی دودویی[1] با استفاده از بیت‌ها[2] به حل مسئله می‌پردازد. مقادیر گسسته‌سازی‌شده‌ی ژن[3] یا متغیرها به‌صورت ریاضی با ضرب‌کردن بردار شامل بیت‌ها در بردار شامل سطوح گسسته‌سازی به‌دست می‌آیند [۱۳]:

$$\begin{aligned}
&\zeta_n=\text{gene}\times Q^{\text{T}}\\
&\text{gene}=[b_1\ b_2\ \ldots\ b_N]\\
&Q=[2^{-1}\ 2^{-2}\ \ldots\ 2^{-N_{\text{gene}}}]
\end{aligned}\tag{۶}$$

که در آنها N_{gene} تعداد بیت‌های هر ژن، b_n بیت‌های دودویی (به‌صورت صفر و یک)، Q بردار گسسته‌سازی و Q^{T} ترانهاده‌ی بردار Q می‌باشند. هر کروموزم در این پژوهش شامل هشت متغیر طراحی است. چهار متغیر اول معرف مدول‌ها و چهار متغیر بعدی نشانگر عرض چرخدنده‌هاست. با توجه به انتخاب مدول‌ها از مجموعه‌ی گسسته‌ی موجود، هر مدول با چهار بیت معادل‌سازی شده است. همچنین، هریک از متغیرهای عرض چرخدنده با هشت بیت گسسته می‌شوند. شکل ۲ هر پاسخ را در فضای ده‌دهی و دودویی نشان می‌دهد.

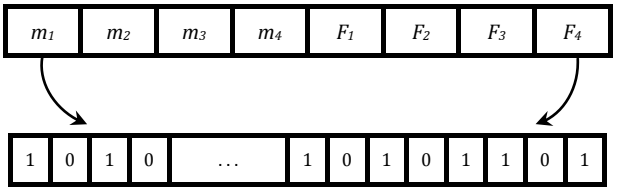
پس از کدگشایی، مقدار شایستگی هریک از داده‌ها به ازای تابع هدف تعیین می‌شود. در مرحله‌ی بعدی، یکی از توابع هدف انتخاب و مرتب می‌شود؛ سپس، جمعیت و مقادیر اهداف دیگر نیز متناظر با ترتیب مقادیر این هدف مرتب می‌شوند. در این مرحله داده‌های نامغلوب شناسایی شده و پس از رتبه‌بندی، از میان جمعیت جدا می‌شوند و این روند تا رتبه‌بندی تمام جمعیت ادامه می‌یابد. اگر مجموعه‌ی توابع هدف به شکل رابطه‌ی (۷) تعریف شود، برای مسئله‌ی کمینه‌سازی، پاسخ x^*، پاسخ x را با شرط برقراری (۸) مغلوب می‌کند [۱۴]:

$$\vec{J}=\ J_1,J_2,\ldots,J_n\tag{۷}$$

$$\forall J_i\in\vec{J},\ J_i(x^*)\le J_i(x)\wedge\ \exists J_i\in\vec{J}\ :\ J_i(x^*)<J_i(x)\tag{۸}$$

برای توزیع یکنواخت‌تر داده‌ها، از اشتراک شایستگی[4] استفاده شده است. بدین منظور ابتدا باتوجه به رابطه‌ی (۹) فاصله‌ی اقلیدسی (d_j) بین جفت جواب x و y در فضای بی‌بعد بین صفر و یک محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$d_j(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{J_i(x)-J_i(y)}{J_i^{\max}-J_i^{\min}}\right)^2}\tag{۹}$$



شکل ۲ شکل شماتیک هر یک از پاسخ‌ها در فضای ده‌دهی و دودویی

1- Binary Genetic Algorithm
2- Bit
3- Gene
4- Fitness Sharing

که در آن $J_i^{\max}$ و $J_i^{\min}$ به‌ترتیب برابر بیشینه و کمینه مقادیر تابع هدف J_i و n تعداد اهداف می‌باشند. پس از آن، مقدار شایستگی[1] برای هر حل x در نسل t به‌صورت رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$nc(x,t)=\sum \max\left\{\frac{\sigma_{\text{share}}-d_j(x,y)}{\sigma_{\text{share}}},\ 0\right\} \qquad (۱۰)$$

مقدار σ_{share} با رابطه‌ی (۱۱) تعیین می‌شود [۱۶]:

$$\sigma_{\text{share}}=\frac{r}{\sqrt[n]{q}}=\frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(J_{k,\max}-J_{k,\min})^2}}{2\times\sqrt[n]{q}} \qquad (۱۱)$$

که در آن q تعداد نقاط اُوج فضای حل می‌باشد. پس از انجام محاسبات، تابع هدف جدید برای هر رتبه به شکل رابطه‌ی (۱۲) تعریف می‌شود [۱۵]:

$$f^*(x,t)=\frac{f(x,t)}{nc(x,t)} \qquad (۱۲)$$

در مرحله‌ی بعد قسمتی از داده‌های با شایستگی کمتر (در این بررسی نیمی از داده‌های نامناسب‌تر) حذف می‌شوند. برای تولید داده‌های جدید، نخست باید والدین انتخاب شوند که برای این منظور از روش انتخاب رقابتی استفاده شده است. پس از انتخاب والدین، داده‌های جدید با استفاده از عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای[2] تولید می‌شوند. این عملگر به‌منظور تولید راه‌حلی جدید دو کرومزوم را باهم ترکیب می‌کند. معمولاً نقاط قطع به‌صورت تصادفی از میان پدر و مادر انتخاب می‌شوند. با اعمال عملگر جهش از همگرایی الگوریتم به کمینه‌ی محلی جلوگیری می‌شود. بدین‌منظور می‌توان نوشت [۱۷]:

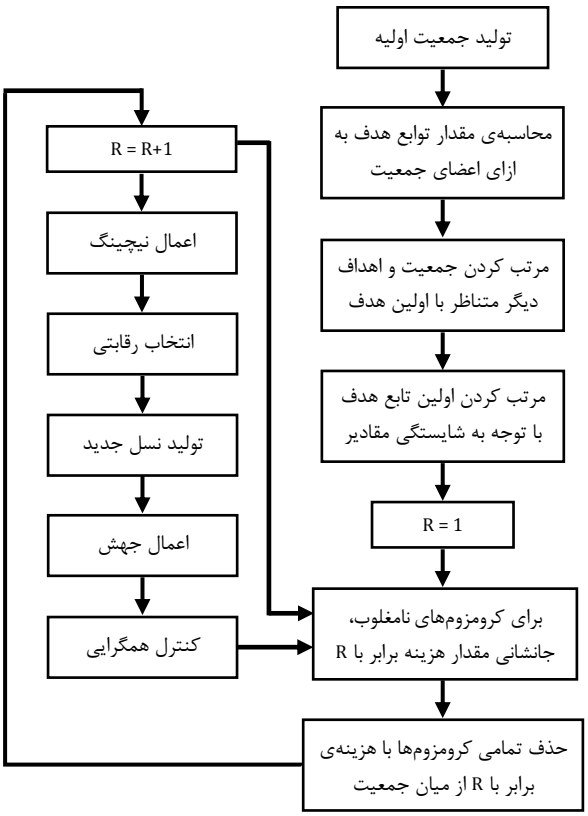
$$\hat{x}=x+z \qquad (۱۳)$$

که در آن x و $\hat{x}$ بردار پاسخ پیش از جهش و پس از اعمال جهش در مبنای دودویی می‌باشند. z نیز نشانگر بردار تغییرات تصادفی است که نقش عملگر جهش را ایفا می‌کند. مقدار نرخ جهش مناسب در رسیدن به پاسخ بهینه اهمیت زیادی دارد؛ به‌طوری‌که با انتخاب نرخ نامناسب، الگوریتم زود هنگام همگرا شده و به پاسخ بهینه نمی‌رسد. این موضوع توسط شجاعی‌فرد و همکارانش [۱۸] به‌تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و روش مناسبی توسط آنان پیشنهاد شده است که در این تحقیق نیز به‌منظور بررسی اثر نرخ جهش، این روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. از این‌رو ابتدا چند مقدار مختلف برای نرخ جهش انتخاب شده و نتایج حاصل از بهینه‌سازی و نرخ همگرایی آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به‌ذکر است که رویه‌های مشابهی در مورد تعداد اعضای جمعیت و ضرایب جریمه نیز تکرار شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پس از این مرحله، مقدار تابع هدف به‌ازای هریک از داده‌های جدید محاسبه شده و مراحل فوق تا همگرایی الگوریتم ادامه می‌یابد. شکل ۳ فلوچارت مراحل این الگوریتم را نشان می‌دهد که در آن R بیانگر رتبه‌ی منتسب به هر کرومزوم می‌باشد.

۴- فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی

در این بررسی با کاربرد الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب به طراحی بهینه‌ی تک‌هدفه، دوهدفه و سه‌هدفه‌ی گیربکس اصلی هلیکوپتر ASH-3D پرداخته شده است. تابع هدف مطرح در بررسی تک‌هدفه‌ی مسئله، کمینه‌سازی جرم چرخدنده‌های گیربکس می‌باشد. توابع هدف درنظر گرفته‌شده در بهینه‌سازی‌های دوهدفه شامل کمینه‌سازی جرم و افزایش ضریب اطمینان

1- Niche Count
2- Single Point Crossover



شکل ۳ فلوچارت الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب

کمینه‌ی موجود می‌باشند. در بهینه‌سازی سه‌هدفه، توابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی جرم، افزایش ضریب اطمینان کمینه‌ی موجود و کاهش اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه‌ی مجموعه‌ی چرخدنده‌ها درنظر گرفته شده‌اند. نکته‌ی مهم در مورد ضرایب اطمینان خستگی این است که بایستی همگی بزرگتر از ضریب اطمینان موردنظر (SF_d برای محاسبات ضریب اطمینان خستگی خمشی و SH_d برای محاسبات ضریب اطمینان خستگی تماسی) باشند تا چرخدنده‌ی خاصی محدودکننده‌ی قید خستگی نباشد و از سوی دیگر به‌منظور استفاده‌ی حداکثری از مواد و ظرفیت کاری چرخدنده‌ها، باید اختلاف بین مقادیر ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه حداقل باشد. روابط (۱۴) توابع هدف موجود را بیان می‌کنند:

$$J^{(1)}=\text{minimize}\ \sum_{i=1}^{z}M_{Gear_i}$$
$$J^{(2)}=\text{maximize}\ \min\ SF_{\min},SH^2_{\min}$$
$$=\text{maximize}\ \ FS_{\min}$$
$$J^{(3)}=\text{minimize}\ \max\ SF_{\max},SH^2_{\max}\ -\min\ SF_{\min},SH^2_{\min} \qquad (۱۴)$$

که در آنها M_{Gear} بیانگر جرم چرخدنده‌ها می‌باشد. همان‌طور که در رابطه‌ی (۱۴) مشاهده می‌شود ضریب اطمینان چرخدنده (FS) بر اساس استاندارد آگما برابر مقدار کمینه‌ی بین ضریب اطمینان خمشی (SF) و مجذور ضریب اطمینان تماسی (SH^2) در نظر گرفته می‌شود.

شکل کلی قیود حاکم بر این طرح نیز در روابط (۱۵) آمده است:

$$g_1:\min(SF)\geq SF_d$$
$$g_2:\min(SH)\geq SH_d$$

$$g_3 : m_n \in \ m_{n,\min}, \ldots, m_{n,\max}$$

$$g_4 : F_{n,\min} \le F_n \le F_{n,\max} \tag{۱۵}$$

که در آنها m_n مدول عمودی و F عرض چرخدنده‌ها می‌باشند.

برای اعمال قیود نامساوی مطرح‌شده در g_1 و g_2، تابع جریمه[1] ($\hat{J}$) به‌کار رفته است. برای قید نمونه‌ی مطرح‌شده در رابطه‌ی (۱۶) تابع جریمه به‌شکل رابطه‌ی (۱۷) به‌کار می‌رود:

$$g(x) \ge g_0 \tag{۱۶}$$

$$\hat{J} = \bar{J} + \kappa \max \ 0 \ , \pm [g_0 - g(x)] \tag{۱۷}$$

در این روابط x بردار ورودی و g_0 مقدار حدی قید است. همچنین، κ نشان‌دهنده‌ی مقدار جریمه می‌باشد که عددی نسبتاً بزرگ انتخاب می‌شود. قیود g_3 و g_4 نیز بر روی متغیرهای طراحی اعمال می‌شوند. از آنجایی‌که انتخاب مقدار ضرایب جریمه‌ی صحیح در همگرایی الگوریتم به پاسخ بهینه اهمیت بالایی دارد، مقادیر مختلف این ضرایب باهم مقایسه شده‌اند.

۴-۱- محاسبات طراحی چرخدنده‌ها بر اساس استاندارد آگما

استاندارد آگما [۹ و ۱۰] که توسط انجمن چرخدنده‌سازان آمریکا ارائه شده است در عرصه‌ی صنعت کاربرد بسیاری داشته و امکان مقایسه‌ی میان طرح‌های مختلف چرخدنده را فراهم می‌سازد. بر اساس این استاندارد، خستگی خمشی و تماسی دو عامل مهم در واماندگی چرخدنده‌ها می‌باشند که بر مبنای پارامترهای وابسته به شرایط کاری و ساخت چرخدنده بیان می‌گردند. هرچند علاوه بر این دو عامل، خراشیدگی[2] و سایش[3] نیز جزو مباحث مهم در واماندگی گیربکس‌های صنعتی می‌باشند، ولی عامل اول بیشتر تحت تأثیر شرایط روانکاری چرخدنده‌ها بوده و بنابراین در پارامترهای طراحی خود چرخدنده‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. عامل سایش نیز به‌دلیل محدودیت وزن چرخدنده‌های مورد استفاده در سیستم انتقال قدرت هلیکوپتر اهمیت خود را از دست می‌دهد [۱۹]. با توجه به روابط (۱۴) و (۱۵)، محاسبه‌ی توابع هدف $J^{(2)}$ و $J^{(3)}$ و اعمال دو قید g_1 و g_2، نیازمند محاسبه‌ی ضرایب اطمینان می‌باشند؛ از این‌رو در ادامه به‌منظور بهینه‌سازی خستگی گیربکس، معادلات ضرایب اطمینان خستگی خمشی و تماسی بر اساس استاندارد آگما برای چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی به‌ترتیب مطابق روابط (۱۸) تا (۲۱) به‌دست می‌آیند [۹،۱۰]. این روابط بر اساس خستگی ناشی از لنگر خمشی و تنش‌های تماسی تدوین شده‌اند که در آن‌ها عوامل ابعاد هندسی، تمرکز تنش و اثرات دینامیکی لحاظ شده است. همچنین مؤسسه‌ی آگما پارامترهای صنعتی از جمله کیفیت ساخت، صافی سطح و یاتاقان‌بندی و غیره را بر اساس داده‌های تجربی به‌صورت ضرایب اصلاحی در این روابط اعمال نموده است.

$$SF = \frac{S_t Y_N Y_J F m_t}{W^t K_o K_v K_s K_H K_B K_T K_R} \tag{۱۸}$$

$$SH = \frac{S_C Z_N C_H}{Z_E K_T K_R \sqrt{W^t K_o K_v K_s \dfrac{K_H}{d_P} \dfrac{Z_R}{F} \dfrac{}{Z_I}}} \tag{۱۹}$$

$$SF = \frac{S_t K_v Y_N F d_G m_t}{2 T_G K_o K_T K_R} \frac{Y_J}{1.2 K_H} \tag{۲۰}$$

$$SH = \frac{S_C Z_N C_H}{Z_E K_T K_R \sqrt{\dfrac{2 T_p K_o}{K_v} \dfrac{1}{F d_G^2} \dfrac{N_G}{N_P} \dfrac{1.2 K_H Z_R}{Z_I}}} \tag{۲۱}$$

که در این روابط S_t تنش خمشی مجاز، S_c تنش تماسی مجاز، SF ضریب اطمینان خمشی، SH ضریب اطمینان تماسی، F عرض چرخدنده، m_t مدول مایل، N_P تعداد دنده‌ی چرخ کوچک، N_G تعداد دنده‌ی چرخ بزرگ می‌باشند. T_P و T_G نیز مقادیر گشتاورهای انتقالی چرخ کوچک و بزرگ و W^t بار مماسی انتقالی بوده و با توجه به معلوم‌بودن مقدار توان و دور ورودی به گیربکس اصلی به‌دست می‌آیند. d_P و d_G به‌ترتیب قطرهای گام چرخ کوچک و بزرگ بوده و بر اساس مدول مایل و تعداد دنده‌ها تعیین می‌گردند.

K_v ضریب پویایی، K_s ضریب اندازه، Y_J ضریب هندسی خمشی، Y_N ضریب عمر تنش خمشی، Z_N ضریب عمر تنش تماسی، Z_I ضریب هندسی تماسی و Z_E ضریب کشسان به‌همراه دیگر ضرایب موجود در معادلات (۱۸) تا (۲۱) که در جدول ۲ معرفی شده‌اند نیز از روابط، نمودارها و جداول موجود در استانداردهای مرجع همچون استاندارد آگما [۹، ۱۰] به‌دست می‌آیند.

همانطور که در روابط (۱۸) تا (۲۱) مشاهده می‌شود، مؤثرترین پارامترها در طراحی چرخدنده‌ها، مدول و عرض چرخدنده‌ها می‌باشند چرا که به‌دلیل حساسیت کارکرد سیستم گیربکس هلیکوپتر سایر پارامترها در بهترین حالت قابل‌وصول در صنعت می‌باشند. برای مثال کیفیت ساخت و صافی چرخدنده‌ها از نوع سنگ‌زنی کاملاً دقیق، یاتاقان‌بندی از نوع کاملاً دقیق با صلبیت مناسب و جنس فولاد ۹۳۱۰ مورد استفاده از مرغوب‌ترین فولادها در ساخت چرخدنده می‌باشند. بنابراین در امر بهینه‌سازی گیربکس صنعتی موجود، پارامترهای قابل‌تغییر زیادی به‌غیر از عرض چرخدنده و مدول آن که تأثیر به‌سزایی در طراحی آن داشته باشند، وجود ندارند. البته درصورت طراحی از نقطه‌ی صفر (طرح جدید) چنین محدودیت‌هایی وجود نداشته و بنابراین می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف را نیز در نظر گرفت؛ هرچند روند کلی بهینه‌سازی مشابه آنچه که در این تحقیق ارائه شده است خواهد بود.

۴-۲- محاسبات جرم

به‌منظور بهینه‌سازی جرم گیربکس، تابع هدف جرم به‌صورت مجموع حاصل‌ضرب حجم اجزا در مقدار چگالی آنها درنظر گرفته شده است. با توجه به تمرکز این پژوهش بر بهینه‌سازی چرخدنده‌ها، تابع هدف جرم به‌صورت مجموع جرم چرخدنده‌ها فرض می‌شود. با در نظر گرفتن شکل هندسی چرخدنده‌های مارپیچ به‌صورت استوانه و چرخدنده‌های مخروطی به‌صورت مخروط ناقص، توابع جرم چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی و تابع هدف جرم گیربکس به‌ترتیب مطابق روابط (۲۲) تا (۲۴) خواهند بود:

$$M_{\text{Helical}} = \pi/4 \, \rho m_t^2 N^2 F \tag{۲۲}$$

$$M_{\text{Spiral Bevel}} = \pi/4 \, \rho F \cos\gamma \times \ m_t^2 N^2 + 2F^2 \sin^2\gamma - 2 m_t N F \sin\gamma \tag{۲۳}$$

$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{z_1} M_{\text{Helical}_i} + \sum_{i=1}^{z_2} M_{\text{Spiral Bevel}_i} \tag{۲۴}$$

در روابط (۲۲) تا (۲۴) پارامترهای ρ، γ، z_1 و z_2 به‌ترتیب معرف چگالی، زاویه‌ی گام چرخدنده‌ی مخروطی، تعداد چرخدنده‌های مارپیچ و مخروطی و M_{Helical}، $M_{\text{SpiralBevel}}$ و M_{total} به‌ترتیب بیانگر توابع جرم چرخدنده‌های مارپیچ، مخروطی و تمامی چرخدنده‌ها می‌باشند.

به‌منظور سادگی انجام مقایسه، تابع هدف جرم برحسب جرم طرح

1- Penalty Function
2- Scuffing
3- Wear

گیربکس صنعتی به‌کاررفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D به‌صورت رابطه‌ی (۲۵) بی‌بعدسازی شده است:

$$\bar{M} = \frac{M_{\text{Design}}}{M_{\text{ASH-3D}}} \qquad (۲۵)$$

به این صورت که طرح‌های با جرم بی‌بعد ($\bar{M}$) کمتر از یک، نسبت به طرح صنعتی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D سبک‌تر بوده و طرح‌های با جرم بی‌بعد بزرگتر از یک، سنگین‌تر می‌باشند. لازم به‌ذکر است که جرم تمامی چرخدنده‌های گیربکس اصلی به‌کار رفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D، بر مبنای ابعاد هندسی موجود برابر ۲۹۷٫۸۶ کیلوگرم برآورد شده است.

۵- نتایج

با کاربرد روش بهینه‌سازی مطرح‌شده، پاسخ‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه برای گیربکسی با مشخصات ذکرشده در جدول ۱ به‌دست آمده است. زوایای فشار و مارپیچ برای چرخدنده‌های مارپیچ به‌ترتیب برابر ۲۰ و ۳۰ درجه و برای چرخدنده‌های مخروطی مارپیچ به‌ترتیب برابر ۲۰ و ۳۵ درجه فرض شده است. دیگر مشخصات و حدود مفروض در
جدول ۳ ارائه شده‌اند. همچنین چرخدنده‌ها از فولاد ۹۳۱۰ ساخته شده‌اند که مشخصات آن نیز در
جدول ۳ آمده است. مدول عمودی به‌عنوان متغیر گسسته‌ی طراحی نیز از میان مجموعه‌ی مدول‌های استاندارد مرجع که در رابطه‌ی (۲۶) ارائه شده است انتخاب می‌شود:

$$m_n = 2,\ 2.25,\ 2.5,\ 2.75,\ 3,\ 3.5,\ 4,\ 4.5,\ 5,\ 5.5,\ 6,\ 7,\ 8,\ 9,\ 10,\ 11,\ 12 \qquad (۲۶)$$

چنان‌که ذکر شد، برای انتخاب تعداد اعضای جمعیت، نرخ جهش و ضرایب جریمه در الگوریتم ژنتیکی، حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا بهترین مقادیر انتخاب شوند. شکل ۴ روند تغییرات مقدار تابع هدف جرم بی‌بعد را بر حسب تعداد نسل برای بهترین عضو جمعیت، به‌ازای نرخ‌های جهش مختلف نمایش می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، نرخ جهش (μ) برابر دو درصد (۰٫۰۲) مناسب‌تر از دیگر مقادیر است.

برای تعیین تعداد اعضای جمعیت (N_{pop}) نیز الگوریتم تدوین‌شده در حالت‌های مختلف اجرا شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای بهترین عضو به‌ازای تعداد اعضای مختلف در شکل ۵ قابل مشاهده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، افزایش جمعیت به بیش از ۶۰۰ عضو تأثیری در همگرایی الگوریتم به نقطه‌ی بهینه ندارد.

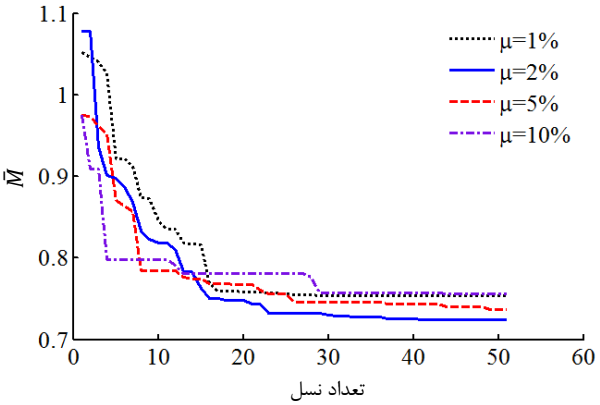
برای انتخاب ضرایب جریمه‌ی مناسب، بهینه‌سازی با مقادیر مختلف این ضرایب صورت گرفته که نتایج حاصل در جدول ۴ قابل مشاهده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، انتخاب ضرایب برابر با ۵ و ۱۰ به‌ترتیب برای κ_1 و κ_2 به نتیجه‌ای بهتر می‌انجامد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در الگوریتم

جدول ۲ معرفی ضرایب مفروض در معادلات خستگی [۹، ۱۰]

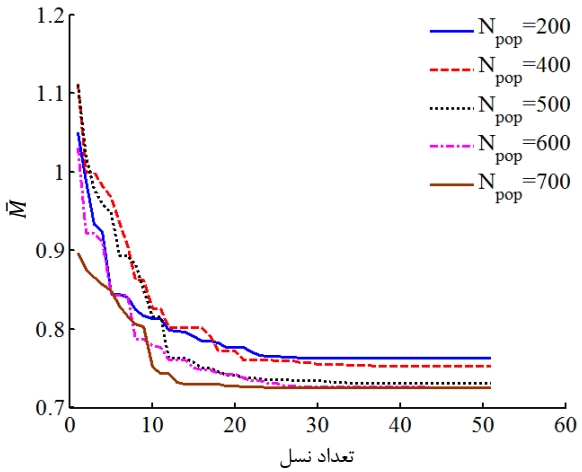
ضریب	مقدار مفروض
ضریب فزونی بار، K_o	۱
ضریب کلفتی طوقه، K_B	۱٫۲۹
ضریب دمایی، K_T	۱
ضریب اعتمادپذیری، K_R	۱٫۲۵
ضریب پرداخت سطح، Z_R	۱٫۱
ضریب نسبت سختی، C_H	۱

جدول ۳ مقادیر و حدود مفروض در حل مسئله

پارامتر	مقدار مفروض
کمینه ضریب اطمینان خمشی مطلوب (SF_d)	۱٫۱
کمینه ضریب اطمینان تماسی مطلوب (SH_d)	۱٫۱
مقاومت تماسی مجاز (MPa) [۱۴]	۱۹۷۷
مقاومت خمشی مجاز (MPa) [۱۴]	۵۰۷
عرض کمینه (mm)	۳۰
عرض بیشینه (mm)	۱۱۰
مدول کمینه (mm)	۲
مدول بیشینه (mm)	۹



شکل ۴ تغییرات مقدار تابع هدف جرم بی‌بعد با تعداد نسل برای بهترین عضو جمعیت به‌ازای نرخ‌های جهش مختلف



شکل ۵ تغییرات مقدار تابع هدف جرم بی‌بعد با تعداد نسل برای بهترین عضو جمعیت به‌ازای تعداد جمعیت‌های مختلف

ژنتیکی به‌کار برده‌شده تعداد جمعیت برابر با ۶۰۰، تعداد نسل برابر با ۵۰، نرخ جهش برابر دو درصد (۰٫۰۲) و تعداد بیت برای هر کروموزوم برابر با ۴۸ در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیکی که در آن کمینه‌سازی جرم چرخدنده‌ها به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است، بیانگر کاهش جرم چرخدنده‌ها تا مقدار ۲۱۶٫۷۱ کیلوگرم می‌باشد که از کاهش ۲۷٫۲۴ درصدی جرم چرخدنده‌های طرح بهینه در مقایسه با گیربکس صنعتی به‌کار رفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D حکایت دارد.

نتایج بهینه‌سازی دوهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب به‌صورت جبهه‌ی پارتو (جبهه‌ی جواب‌های بهینه) در شکل ۶ نمایش داده شده است. به‌منظور مقایسه‌ی نتایج حاصل با طرح گیربکس صنعتی موجود به‌کاررفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D، نقطه‌ی متناظر با مقدار جرم و ضریب اطمینان کمینه‌ی آن نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود اهداف طراحی باهم متناقض بوده و از این‌رو جواب یکتا برای مسئله‌ی بهینه‌سازی وجود ندارد؛ بنابراین طرح‌های با ضریب اطمینان کمینه‌ی بیشتر، جرم بیشتری خواهند داشت و بالعکس. باتوجه به اینکه یکی از توابع هدف مسئله افزایش ضریب اطمینان کمینه‌ی گیربکس می‌باشد، به‌منظور تبدیل مسئله‌ی بیشینه‌سازی به یک مسئله‌ی کمینه‌سازی، تابع این هدف با یک علامت منفی ($-FS$) تعریف شده است؛ زیرا هرچه مقدار این تابع کمینه‌تر باشد مقدار عددی آن از نظر قدرمطلق که بیانگر مقدار ضریب اطمینان کمینه می‌باشد، بزرگتر است.

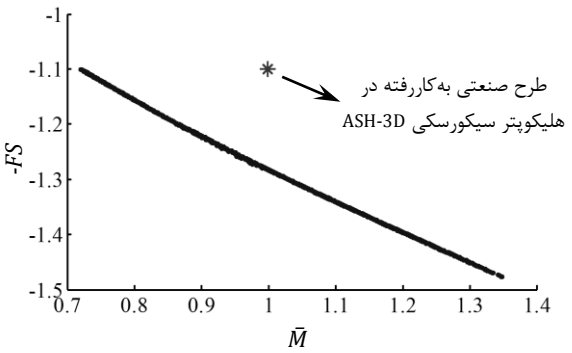
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه‌ی موجود دارای جواب بهینه‌ی منحصربه‌فردی نمی‌باشد؛ از این‌رو در جدول ۵، مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی مدول عمودی (m_n) و عرض چرخدنده‌های (F) مربوط به دو جواب متمایز که یکی دارای کمترین جرم و دیگری بیشترین ضریب اطمینان می‌باشند، ارائه شده‌اند. از میان جواب‌های به‌دست‌آمده، به‌علت اهمیت جرم در طراحی هلیکوپتر، جوابی که حداقل جرم چرخدنده‌ها را داشته و در عین حال ضرایب اطمینان تک‌تک چرخدنده‌ها در آن از مقدار مطلوب ۱/۱ بیشتر است، انتخاب شده و ضرایب اطمینان چرخدنده‌های مختلف پس از انجام محاسبات در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

نتایج به‌دست‌آمده برای ضرایب اطمینان خمشی و تماسی چرخدنده‌ها از رفتار متفاوت چرخدنده‌های مخروطی و مارپیچ در خستگی‌های خمشی و تماسی حکایت دارند؛ به‌طوری‌که در یک بارگذاری ثابت، در خستگی خمشی چرخدنده‌های مخروطی دارای ضریب‌اطمینان کمینه بوده و تعیین‌کننده‌ی خستگی می‌باشند اما در خستگی تماسی چرخدنده‌های مارپیچ ضریب‌اطمینان کمینه را داشته و عامل تعیین‌کننده‌ی خستگی هستند. این موضوع به‌وضوح در شکل ۸ که ضرایب اطمینان خستگی خمشی و تماسی چرخدنده‌های گیربکس صنعتی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است. لازم به‌ذکراست که چرخدنده‌ی داخلی AA (رجوع شود به شکل ۱) به‌علت دربرگیری چرخدنده‌های خورشید و سیاره‌ای، ابعاد نسبتاً بزرگ و ضریب اطمینان بالایی داشته و در شکل ۸ ارائه نشده است.

نتایج بهینه‌سازی سه‌هدفه نیز به‌صورت جبهه‌ی پارتوی سه‌بعدی که به‌شکل یک رویه‌ی فضایی می‌باشد، در شکل ۹ نمایش داده شده است. تابع هدف سومی که علاوه بر توابع هدف کمینه‌سازی جرم و افزایش ضریب اطمینان کمینه‌ی چرخدنده‌ها، در بهینه‌سازی سه‌هدفه درنظر گرفته می‌شود

جدول ۴ مقایسه‌ی همگرایی به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه

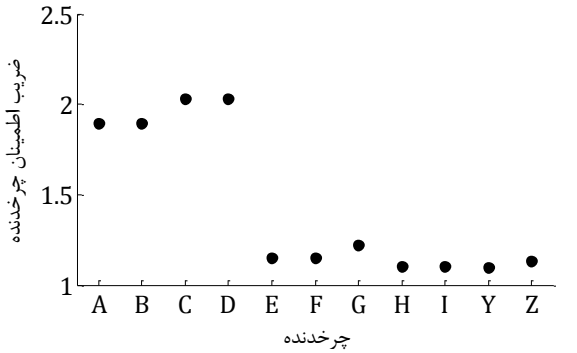
ردیف	K_1	K_2	جرم تمامی چرخدنده‌های گیربکس اصلی (kg)	طرح انتخابی
آ	۵	۷	۲۱۷/۰۵	
ب	۵	۱۰	۲۱۶/۷۱	*
پ	۷	۱۵	۲۲۰/۴۷	
ت	۱۰	۱۵	۲۱۷/۳۰	



شکل ۶ جبهه‌ی جواب‌های بهینه در بهینه‌سازی دوهدفه

جدول ۵ نمونه‌ی مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی در بهینه‌سازی دوهدفه

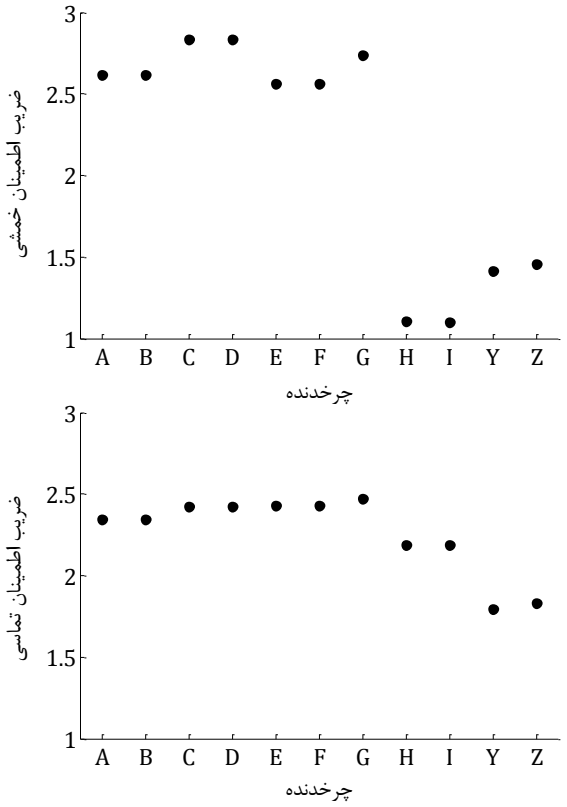
چرخدنده (مطابق شکل ۱)	جواب دارای کمترین جرم		جواب دارای بیشترین ضریب اطمینان	
	m_n (mm)	F (mm)	m_n (mm)	F (mm)
A و B و C و D	۲	۴۰/۱۸	۲	۷۹/۳۲
E و F و G	۲/۲۵	۴۲/۴۶	۲	۹۹/۲۷
H و I	۷	۹۵/۶۰	۹	۱۰۸/۱۹
Y و Z و AA	۳	۶۴/۴۸	۳	۱۰۹/۹۳



شکل ۷ توزیع ضرایب اطمینان چرخدنده‌ها برای طرح دارای کمینه جرم چرخدنده‌ها (نام‌گذاری چرخدنده‌ها مطابق شکل ۱)

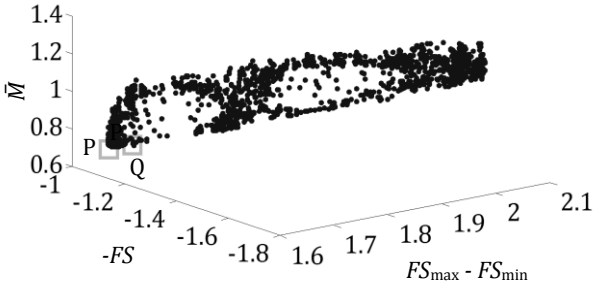
کاهش اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه‌ی مجموعه‌ی چرخدنده‌ها می‌باشد که به‌منظور استفاده‌ی حداکثری از ظرفیت ماده‌ی چرخدنده‌ها و یکنواختی بیشتر توزیع ضرایب اطمینان مورد توجه قرار می‌گیرد؛ به‌این صورت که هرچه میزان اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه، بیشتر باشد چرخدنده‌ی دارای ضریب اطمینان کمینه به‌عنوان عامل محدودکننده از نظر خستگی عمل کرده و تعیین‌کننده‌ی میزان بار انتقالی گیربکس خواهد بود، در نتیجه چرخدنده‌ی دارای ضریب اطمینان بیشینه تحت باری قرار می‌گیرد که به مراتب کمتر از ظرفیت کاری آن است و به‌این ترتیب گیربکس نمی‌تواند تحت ظرفیت تنشی کامل خود عمل کند. در شکل ۹ نیز تابع هدف جرم برحسب جرم طرح گیربکس صنعتی به‌کاررفته در هلیکوپتر ASH-3D بی‌بعدسازی شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بهینه‌سازی سه‌هدفه نیز اهداف طراحی



شکل ۸ توزیع ضرایب اطمینان خمشی و تماسی برای گیربکس صنعتی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D (نام‌گذاری چرخدنده‌ها مطابق شکل ۱)

باهم متناقض بوده و از این‌رو جواب یکتا برای مسئله‌ی بهینه‌سازی وجود ندارد؛ در نتیجه مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی مدول عمودی و عرض چرخدنده‌ها برای سه جواب متمایز که یکی دارای کمترین جرم، دومی بیشترین ضریب اطمینان و دیگری کمترین اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه می‌باشند، در جدول ۶ ارائه شده‌اند.



شکل ۹ جبهه‌ی پارتو یا جبهه‌ی جواب‌های بهینه در بهینه‌سازی سه‌هدفه

۶- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی نتایج حاصل، در این تحقیق می‌تواند به دو صورت بررسی شود. در قسمت اول نتایج حاصل از گیربکس بهینه‌شده با گیربکس صنعتی موجود مقایسه می‌گردد که در صورت وجود اختلاف فاحش که مشکلات تولید یا مونتاژ را دربر خواهد داشت، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند بهینه‌سازیبه نتیجه‌ی مطلوبی نرسیده است؛ علاوه بر آن تأمین هدف اصلی که کاهش وزن گیربکس موجود می‌باشد نیز می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور نتایج حاصل از این تحقیق با مشخصات چرخدنده‌های گیربکس صنعتی موجود که توسط کارخانه‌ی سازنده مورد استفاده قرار گرفته، در جدول ۷ مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ضمن اینکه تغییرات هندسی چرخدنده‌ها در محدوده‌ی قابل وصول در تولید صنعتی می‌باشند، وزن کل چرخدنده‌ها ۲۷/۲۴ درصد کاهش یافته و همچنین ضریب اطمینان و توزیع آن در چرخدنده‌های مختلف از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار شده‌اند.

در قسمت دوم، مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های مختلف بهینه‌سازی مدنظر می‌باشد که در آن برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از بهینه‌سازی سه‌هدفه با نتایج حاصل از روش مجموع توابع هدف وزن‌دار مقایسه شده‌اند. بدین منظور، ترکیب خطی وزن‌دار اهداف مطابق رابطه‌ی (۲۷) به عنوان تابع هدف فرض شده است [۲۰]:

$$\bar{J} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \bar{J}^{(i)} \qquad (۲۷)$$

که در آن $\bar{J}^{(i)}$ و λ_i به‌ترتیب تابع هدف بی‌بعد و ضریب وزنی iام می‌باشند. با استفاده از این روش، مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه، به مسئله‌ای با یک هدف کاهش می‌یابد که با تغییر ضرایب وزنی، جواب‌های مختلف مسئله‌ی بهینه‌سازی به‌دست می‌آیند. ضرایب بی‌بعدسازی بایستی به‌گونه‌ای انتخاب شوند که شرایط معادلات (۲۸) برقرار باشند [۲۰]:

$$0 \le \bar{J}^{i} \le 1$$
$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \qquad (۲۸)$$

چنانچه x^{i*} بردار پاسخ در بهینه‌سازی تک‌هدفه باشد، تابع هدف با استفاده از رابطه‌ی (۲۹) بی‌بعدسازی می‌شود [۲۰]:

$$\bar{J}^{i} = \frac{J_i - J_i^U}{J_i^N - J_i^U} \qquad (۲۹)$$

که در آن، J_i^U مقدار تابع هدف به‌ازای x^{i*} بوده و J_i^N نیز مطابق رابطه‌ی (۳۰) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$J_i^N = \max\left[J_i(x^{1*}), J_i(x^{2*}), J_i(x^{3*})\right] \qquad (۳۰)$$

جدول ۶ نمونه‌ی مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی در بهینه‌سازی سه‌هدفه

چرخدنده (مطابق شکل ۱)	جواب دارای کمترین جرم		جواب دارای بیشترین ضریب اطمینان		جواب دارای کمترین اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه	
	m_n (mm)	F (mm)	m_n (mm)	F (mm)	m_n (mm)	F (mm)
A و B و C و D	۲	۴۰/۱۸	۲	۷۹/۳۲	۲	۴۰/۱۳
E و F و G	۲/۲۵	۴۲/۴۶	۲	۹۹/۲۷	۲	۹۵/۰۸
H و I	۷	۹۵/۶۰	۹	۱۰۸/۱۹	۹	۱۰۷/۷۹
Y و Z و AA	۳	۶۴/۴۸	۳	۱۰۹/۹۳	۳	۶۴/۴۷

جدول ۷ مقایسه‌ی مقدار متغیرهای طراحی در گیربکس صنعتی موجود با طرح بهینه‌ی به‌دست‌آمده

چرخدنده	گیربکس صنعتی به‌کار رفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D		طرح بهینه‌ی به‌دست‌آمده	
	مدول عمودی m_n (mm)	عرض چرخدنده F (mm)	مدول عمودی m_n (mm)	عرض چرخدنده F (mm)
A و B و C و D	۲	۵۹/۰۶	۲	۴۰/۱۸
E و F و G	۲/۷۵	۶۸/۲۵	۲/۲۵	۴۲/۴۶
H و I	۷	۹۵/۶۱	۷	۹۵/۶۰
Y و Z و AA	۳	۸۷/۲۵	۳	۶۴/۴۸
جرم تمامی چرخدنده‌های گیربکس اصلی (kg)	۲۹۷٫۸۶		۲۱۶٫۷۱	
ضریب اطمینان کمینه	۱٫۱		۱٫۱	
بیشترین اختلاف ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه	۱٫۸۵		۱٫۶۲	

نتایج حاصل از روش مجموع توابع هدف وزن‌دار با دو نقطه‌ی P و Q در شکل ۹ قابل مشاهده‌اند که در نقطه‌ی Q ضرایب وزنی سه هدف برابر بوده و در نقطه‌ی P، برای اهداف اول تا سوم ضرایب وزنی به‌ترتیب برابر با ۰٫۷، ۰٫۲ و ۰٫۱ می‌باشند. از آنجاکه بیشترین دغدغه‌ی طراحان گیربکس سیستم محرکه‌ی هلیکوپتر کاهش وزن آن می‌باشد، ضریب وزنی برای این پارامتر غالباً مقدار بیشتری به‌خود می‌گیرد که برای مثال در این تحقیق برابر ۰٫۷ انتخاب شده است ولی در هر حال پارامترهای ضریب اطمینان و توزیع مناسب آن نیز اهمیت خود را دارند. با توجه به اینکه نقطه‌ی شروع فرایند بهینه‌سازی، مقادیر گیربکس موجود می‌باشند که سال‌هاست عملاً از نظر استحکام پاسخگوی نیازهای طراحی بوده‌اند لذا به‌نظر می‌رسد از نظر ضریب اطمینان تغییر چندانی در طرح موجود لازم نباشد. به‌همین دلیل ضریب وزنی این پارامتر می‌تواند کم اثر درنظر گرفته شود (برای مثال ۰٫۲). به‌منظور بررسی تأثیر این ضرایب، مقادیر متفاوت دیگری نیز می‌توان انتخاب نمود برای مثال نقطه‌ی Q در شکل ۹ حالتی را نشان می‌دهد که در آن هر سه ضریب مقدار یکسانی را دارند. چنان‌که مشهود است، پاسخ‌های به‌دست‌آمده روی جبهه‌ی پارتوی سه‌بعدی قرار دارند.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله پس از گسترش معادلات خستگی چرخدنده‌های گیربکس اصلی هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D، به بهینه‌سازی تک‌هدفه‌ی مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیکی و نیز بهینه‌سازی دوهدفه و سه‌هدفه به‌روش الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب پرداخته شده و دو پارامتر طراحی مدول عمودی (m_n) و عرض چرخدنده‌ها (F) برای هریک از چرخدنده‌های موجود تعیین گردیده است. در بهینه‌سازی تک‌هدفه، تابع هدف به‌صورت کاهش جرم چرخدنده‌ها تعیین شده و در ادامه، در بهینه‌سازی دوهدفه تابع هدف افزایش ضریب اطمینان کمینه‌ی موجود و نیز در بهینه‌سازی سه‌هدفه، تابع هدف کاهش اختلاف میان ضرایب اطمینان کمینه و بیشینه‌ی مجموعه‌ی چرخدنده‌ها به مسئله اضافه شده‌اند. از آنجایی‌که پارامتر مدول عمودی (m_n) از میان مجموعه‌ی مدول‌های استاندارد مرجع انتخاب شده و متغیری گسسته به‌شمار می‌آید و در مقابل پارامتر عرض چرخدنده‌ها (F) نیز متغیری پیوسته است، بهینه‌سازی با استفاده از متغیرهای گسسته- پیوسته‌ی ترکیبی صورت می‌گیرد.

نتایج به‌دست‌آمده در بهینه‌سازی تک‌هدفه حاکی از کاهش ۲۷٫۲۴ درصدی جرم چرخدنده‌های طرح بهینه در مقایسه با گیربکس صنعتی به‌کار رفته در هلیکوپتر سیکورسکی ASH-3D می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی‌های دوهدفه (شکل ۶) و سه‌هدفه (شکل ۹) نیز به‌صورت جبهه‌ی جواب‌های بهینه ارائه شده‌اند. در بهینه‌سازی‌های دوهدفه و سه‌هدفه، با توجه به وجود تناقض میان اهداف طراحی، جواب یکتا برای مسئله‌ی بهینه‌سازی وجود نداشته و هریک از جواب‌های روی جبهه‌ی پارتو از نظر حداقل یکی از اهداف بهینه‌سازی بر جواب‌های دیگر غلبه دارد؛ از این‌رو در بهینه‌سازی‌های دوهدفه (جدول ۵) و سه‌هدفه (جدول ۶) مقادیر پارامترهای طراحی برای جواب‌هایی با حالت‌های حدی به‌عنوان نمونه آورده شده‌اند.

۸- فهرست علائم

C_H	ضریب نسبت سختی
d	قطر گام چرخدنده (mm)
F	عرض چرخدنده (mm)
FS	ضریب اطمینان معادل یا مؤثر
g	قیود نامساوی
h	قیود تساوی
J	بردار توابع هدف
K_B	ضریب کلفتی طوقه
K_H	ضریب توزیع بار
K_o	ضریب فزونی بار
K_R	ضریب اعتمادپذیری
K_s	ضریب اندازه
K_T	ضریب دمایی
K_v	ضریب پویایی
$\bar{M}$	جرم بی‌بعد
m_n	مدول عمودی (mm)
m_t	مدول مایل (mm)
N	تعداد دنده‌ی چرخدنده
N_{pop}	تعداد اعضای جمعیت
p	بردار ثوابت
S_c	تنش تماسی مجاز (MPa)

S_F	ضریب اطمینان خمشی
S_H	ضریب اطمینان تماسی
S_t	تنش خمشی مجاز (MPa)
t	تعداد نسل
T	گشتاور انتقالی (N.mm)
W^t	بار مماسی انتقالی (N)
x	بردار متغیرهای طراحی
y	بردار متغیرهای طراحی
Y_J	ضریب هندسی خمشی
Y_N	ضریب عمر تنش خمشی
Z_E	ضریب کشسان ($\sqrt{\text{MPa}}$)
Z_I	ضریب هندسی تماسی
Z_N	ضریب عمر تنش تماسی
Z_R	ضریب پرداخت سطح

علائم یونانی

Γ	زاویه‌ی گام چرخدنده‌ی مخروطی (degree)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
λ	ضریب وزنی
μ	نرخ جهش

زیرنویس‌ها

d	مقدار موردنظر
P	چرخ کوچک
G	چرخ بزرگ

۹- تشکر و سپاسگزاری

در این بخش، نویسندگان بر خود فرض می‌دانند تا کمال تشکر و سپاسگزاری خود را از مهندسان شرکت پشتیبانی و نوسازی هلیکوپترهای ایران (پنها) به‌ویژه جناب آقای مهندس طباطبایی ابراز دارند؛ چراکه راهنمایی‌های ارزشمند و کمک‌های بی‌دریغ ایشان نقش به‌سزایی در به‌ثمر رسیدن این پژوهش داشته است.

۱۰- مراجع

[1] M. Ognjanovic, Decisions in gear train transmission design, *Research in Engineering Design*, Vol. 8, No. 3, pp. 178-187, 1996.
[2] T. Yokota, T. Taguchi, M. Gen, A solution method for optimal weight design problem of the gear using genetic algorithms, *Computers & industrial engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 523-526, 1998.
[3] D. F. Thompson, S. Gupta, A. Shukla, Tradeoff analysis in minimum volume design of multi-stage spur gear reduction units, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 35, No. 5, pp. 609-627, 2000.
[4] J. Marcelin, Genetic optimisation of gears, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 12, pp. 910-915, 2001.
[5] V. Savsani, R. Rao, D. Vakharia, Optimal weight design of a gear train using particle swarm optimization and simulated annealing algorithms, *Mechanism and machine theory*, Vol. 45, No. 3, pp. 531-541, 2010.
[6] A. K. Singh, H. P. Gangwar, R. Saxena, A. Misra, Optimization of Internal Spur Gear Design Using Genetic Algorithm, *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-30, 2012.
[7] A. Swantner, M. I. Campbell, Topological and parametric optimization of gear trains, *Engineering Optimization*, Vol. 44, No. 11, pp. 1351-1368, 2012.
[8] S. i. Golabi, J. J. Fesharaki, M. Yazdipoor, Gear train optimization based on minimum volume/weight design, *Mechanism and Machine Theory*,Vol. 73, pp. 197-217, 2014.
[9] A. Standard, Fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gear teeth, *ANSI/AGMA*, pp. B88, 2001.
[10] A. Standard, Design Manual for Bevel Gears, *ANSI/AGMA* 2005-D03, 2005.
[11] V. B. Jammu, D. Lewicki, K. Danai, Structure-based connectionist network for fault diagnosis of helicopter gearboxes, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 1, pp. 100-105, 1998.
[12] M.H. Shojaeifard, R. Talebitooti, M. Torabi, R. Ahmadi, Optimization of inhomogeneous rotating discs by the ingredient method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.14, No.1, pp. 27-34, 2014 (In Persian).
[13] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical genetic algorithms*, John Wiley & Sons, 2004.
[14] K. Anagnostopoulos, G. Mamanis, A portfolio optimization model with three objectives and discrete variables, *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 7, pp. 1285-1297, 2010.
[15] A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith, Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 9, pp. 992-1007, 2006.
[16] K. Deb, D. E. Goldberg, An investigation of niche and species formation in genetic function optimization, *in Proceeding of, Morgan Kaufmann Publishers Inc.*, pp. 42-50, 1989.
[17] R. Spallino, S. Rizzo, Multi-objective discrete optimization of laminated structures, *Mechanics Research Communications*, Vol. 29, No. 1, pp. 17-25, 2002.
[18] M.H. Shojaeifard, R. Talebitooti, S. Yarmohammadi Satri, Enhancing rollover threshold of fuel tanks based on designing optimization algorithm, Modares Mechanical Engineering, Vol.13, No.1, pp. 1-12, 2013 (In Persian).
[19] A. Standard, Effect of Lubrication on Gear Surface Distress, AGMA 925-A03, 2003.
[20] I. Y. Kim, O. De Weck, Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation, *Structural and multidisciplinary optimization*, Vol. 29, No. 2, pp. 149-158, 2005.