

روش‌های بهینه‌سازی وزن گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا

فرید وکیلی تهامی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اکبر رسولیان*

دانشجوی دکترا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

ساناز سعادتمند هاشمی

دانشجوی کارشناسی‌ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

امروزه یکی از مقوله‌های مهم در علوم مهندسی، بهینه‌سازی طرح‌های جدید به منظور رقابت در عرصه‌ی بازار صنعتی می‌باشد. در صنایع هوافضا، وزن و عمر قطعات از معیارهای بسیار مهم طراحی می‌باشند. به عنوان مثال، مسئله بهینه‌سازی وزن گیربکس اصلی هلیکوپترها، توأم با عملکرد و عمر خستگی قابل قبول آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، پارامترهای طراحی گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا، با استفاده از سه روش مختلف بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیکی (GA)، اجتماع ذرات (PSO) و جستجوی گرانشی (GSA) تعیین شده‌اند. تابع هدف مسئله، جرم چرخنده‌ها با قیود مختلف مبتنی بر محدودیت‌های هندسی می‌باشد. ضرایب اطمینان خستگی نیز مطابق روابط آگما (AGMA) در نظر گرفته شده‌اند. متغیرهای طراحی موجود شامل عرض چرخنده‌ها به عنوان پارامتری پیوسته و مدول عمودی آنها به عنوان پارامتری گسسته می‌باشند. هر چند مقایسه‌ی نتایج بهینه‌سازی، حاکی از موفقیت هر سه روش در کمینه‌سازی حدود ۲۳ تا ۲۷ درصدی وزن گیربکس نسبت به طرح صنعتی موجود هستند اما الگوریتم جستجوی گرانشی نه تنها بهترین جواب بهینه از نظر وزن را به دست می‌دهد، بلکه بیشترین سرعت همگرایی را نیز داشته است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی وزن، خستگی، گیربکس هلیکوپتر، الگوریتم ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات، الگوریتم جستجوی گرانشی.

Optimization Methods for the Weight of Agusta Helicopter Main Gearbox

F. Vakili-Tahami

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

A. Rasoulia

Young Researchers and Elite Club, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

S. Saadatmand Hashemi

Young Researchers and Elite Club, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

Nowadays, one of the most important challenges in engineering sciences is optimization of the existing designs due to the competitive industrial market. In aviation industry, weight and life of components are important criterions in their design. As an example, optimizing the weight of main gearbox of helicopters with acceptable performance and fatigue life are major concerns. In this paper, design parameters of Agusta helicopter main gearbox has been determined by three different optimization methods: Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Algorithm (PSO) and the Gravitational Search Algorithm (GSA). The objective function is the weight of the gears with appropriate constraints which are based on geometrical limitations. Also safety factors according to the AGMA standards are considered. The design parameters are gear width as a continuous variable and normal module as a discrete parameter. Comparison of the results show that all three optimization methods are able to minimize the weight of the gearbox in the range of 23 to 27% comparing with the existing one; but, GSA not only gives the best optimized solution it also has the highest convergence rate.

Keywords: Weight Optimization, Fatigue, Helicopter Gearbox, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization Algorithm, Gravitational Search Algorithm.

۱- مقدمه

امروزه 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 به دلیل کاربردهای استراتژیک و امکان فرود آنها در اماکن مختلف و محدود، سرعت بیشتری داشته است. از میان سیستم‌های مختلف موجود در 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) به منظور جلوگیری از آسیب نوک

ملخ، کاهش صدا و افزایش گشتاور آن می‌باشد. به دلیل پیچیدگی سیستم مکانیکی گیربکس اصلی، وزن آن نسبت به سایر قطعات بالا می‌باشد. علاوه بر آن، متمرکز بودن این وزن از لحاظ حفظ تعادل سامانه‌ی هلیکوپتر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به همین دلیل مسئله‌ی کاهش وزن آن از دو جنبه‌ی مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد. کاهش وزن، مقدار ماده مصرفی و هزینه‌ی تولید را کاهش داده و از طرف دیگر، مصرف سوخت و تعادل در پرواز را بهبود می‌بخشد. علاوه بر آن، مسئله‌ی خستگی و افزایش عمر قطعات نیز باتوجه به هزینه‌ی ساخت و یا تعمیر آنها باید مورد توجه قرار گیرد. با کاهش میزان تعمیرات و تعویض قطعات از تأخیرهای احتمالی نیز کاسته می‌شود.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.s.rasoulia@gmail.com

بهینه‌سازی چرخنده از پژوهش‌های نسبتاً نوپاست. از اولین کارهای صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های آنجانویچ [۱] در سال ۱۹۹۶ میلادی اشاره کرد که ساختاری را برای چگونگی تصمیم‌گیری در طراحی گیربکس‌ها بر مبنای روابط حاکم بر مسئله ارائه کرده است. ساختار ارائه شده به صورت یک برنامه‌ی کامپیوتری بوده و به تصمیم‌گیری‌های سودمند در طراحی گیربکس‌ها منجر شده است. یاکوتا و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۸ میلادی روش حلی به‌منظور دستیابی به وزن بهینه‌ی چرخنده با استفاده از الگوریتم ژنتیکی ارائه نموده‌اند. نتایج حاصل بیانگر کارایی روش پیشنهادی و کاهش وزن چرخنده‌ها و نیز فضای مورد نیاز بودند. چانگ و لی [۳] در سال ۲۰۰۰ میلادی از الگوریتم ژنتیکی برای طراحی بهینه‌ی گیربکس دو مرحله‌ای یک مجموعه‌ی چرخنده‌ای خورشیدی ساده با چرخنده‌های مارپیچ بر اساس کمینه‌سازی حجم استفاده کرده‌اند. آنان پارامترهای مختلف طراحی مانند مقاومت و تداخل را بر مبنای استانداردهای آگما در نظر گرفته‌اند. باربیری و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۷ میلادی دو تکنیک متفاوت، اولی یک رویکرد اکتشافی تکرارشونده و دومی الگوریتم ژنتیکی، برای طراحی بهینه‌ی پروفیل چرخنده‌های ساده به منظور کاهش ارتعاش دندانه‌ها ارائه داده‌اند. در این پژوهش توابع هدف مختلفی بررسی شده و شبیه‌سازی‌های دینامیکی متفاوتی صورت گرفته‌اند تا کارایی طرح‌های جدید ارائه شده با توجه به خطای موجود در انتقال قدرت استاتیکی مورد ارزیابی قرار گیرند. ساوسانی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ میلادی به بهینه‌سازی یک گیربکس با چرخنده‌های ساده با استفاده از دو الگوریتم اجتماع ذرات و شبیه‌ساز تبرید (SA) پرداخته‌اند. هدف آنها بهینه‌سازی پارامترهای مختلف طراحی به‌منظور دستیابی به طرح بهینه از نظر وزن بوده که نتایج، نشان از سرعت بالای همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات در این زمینه داشته است. تودوس و همکاران [۶] در همین سال طرحی بهینه برای یک کاهنده‌ی دوسرعه با چرخنده‌های مارپیچ ارائه کرده‌اند. در پژوهش آنان برای بهینه‌سازی طرح از یک الگوریتم تکاملی تقویت‌شده مبتنی بر الگوی زیست‌شناختی استفاده شده است که امکان بررسی همزمان قیود مسئله به صورت اکتشافی را فراهم می‌آورد. با این حال به دلیل گستردگی پارامترهای طراحی، تنها تعدادی از جواب‌های بهینه با طرح‌های موجود مقایسه شده‌اند. مندی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ میلادی به بهینه‌سازی ابعادی قطر شفت و یاتاقان و نیز مدول یک سیستم چرخنده‌ای ساده با استفاده از الگوریتم ژنتیکی پرداخته‌اند. آنها طرحی با حجم کمتر که قابلیت تحمل بار وارده‌ی معین را داشته باشد به عنوان طرح بهینه برگزیده‌اند. جیون و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۱ میلادی به بررسی و تعیین شکل بهینه‌ی چرخنده‌های ساده و مارپیچ با استفاده از یک نرم‌افزار خودکار پرداخته‌اند. بسیاری از پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در این زمینه با فرض‌های دوبعدی بوده‌اند اما نرم‌افزار به کار برده شده توسط جیون و همکاران مدلی سه‌بعدی از چرخنده‌ها با پروفیل‌های اینولوت ارائه می‌داد. سان و زینانگ [۹] در سال ۲۰۱۲ میلادی طراحی بهینه‌ی یک گیربکس کاهنده را برای جلوگیری از اتلاف انرژی، کاهش وزن و حجم گیربکس و همچنین افزایش بازده، مورد مطالعه قرار داده‌اند. علاوه بر این، نتایج و سرعت حل الگوریتم‌های ژنتیکی مختلف را نیز با یکدیگر مقایسه نموده‌اند. مرماز و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۳ میلادی روشی

جدید به‌منظور بهینه‌سازی چرخنده‌های مخروطی مارپیچ از نظر هندسی ارائه کرده‌اند. نتایج این پژوهش بیانگر این موضوع است که روش جدید نه تنها زمان دستیابی به هندسه‌ی بهینه را کاهش داده بلکه شکل هندسی حاصل به دلیل کاستن از میزان فشار تماسی، مقاومت خستگی چرخنده را به مقدار مناسبی بهبود بخشیده است. در کاربردهای صنعتی نیز هندسه‌ی پروفیل بهینه با کاهش چشمگیر میزان ارتعاش چرخنده‌های مخروطی، دوام بیشتری به گیربکس‌های هلیکوپتر موجود داده است. راثو [۱۱] در سال ۲۰۱۶ میلادی به بهینه‌سازی وزن یک گیربکس با چرخنده‌های ساده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) پرداخته است. قیود حاکم، مقاومت خمشی و تماسی چرخنده‌ها و مقاومت پیچشی شفت‌ها می‌باشند.

نتایج ارائه شده در ادبیات فن، حاکی از کارایی بهتر برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در ارائه‌ی جواب، نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارند. به همین دلیل در این پژوهش، از سه روش مختلف بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیکی (GA)، الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) و الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) برای کمینه‌سازی جرم یا وزن گیربکس اصلی هلیکوپتر استفاده شده است. به این ترتیب نه تنها هدف صنعتی که همان کاهش وزن گیربکس تا حد مطلوب می‌باشد، برآورده می‌شود بلکه کارایی روش‌های مختلف بهینه‌سازی نیز مقایسه می‌گردد. تابع هدف، مجموع جرم چرخنده‌ها بوده و قیود مختلف از جمله شرایط و محدودیت‌های هندسی و ضرایب اطمینان مناسب بر آن اعمال شده‌اند. برای محاسبه‌ی ضرایب اطمینان، از روابط خستگی خمشی و تماسی آگما (AGMA) استفاده شده است. پارامترهای طراحی موجود شامل عرض چرخنده‌ها (F) و مدول عمودی آنها (m_n) می‌باشند که در این بین، عرض چرخنده‌ها پارامتری پیوسته بوده ولی مدول عمودی از مجموعه‌ی مرجع مدول‌های استاندارد انتخاب شده و از این رو تغییری گسسته محسوب می‌گردد. در نتیجه مسئله‌ی بهینه‌سازی با استفاده از نسخه‌ی باینری برای هر سه روش حل شده است. در نهایت نتایج حاصل از هر سه روش با یکدیگر مقایسه شده و کمینه‌ی جرم به دست آمده با مقدار جرم گیربکس صنعتی موجود مقایسه شده است.

۲- مشخصات مسئله

هدف این پژوهش، بهینه‌سازی گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا ASH-3D می‌باشد که در شکل ۱ به صورت طرحواره مشاهده می‌شود. هلیکوپتر آگوستا دارای دو موتور توربین گازی از نوع General Electric T58-GE-10 می‌باشد که هریک توانی برابر با ۱۴۰۰ اسب بخار (توان کل برابر با ۲۸۰۰ اسب بخار) را فراهم می‌سازند. دور موتور ورودی به گیربکس اصلی (چرخنده‌های A و B در شکل ۱) برابر با ۱۸۹۶۶ و دور خروجی از گیربکس یا دور ملخ اصلی (شفت BB در شکل ۱)، ۲۰۳ دور در دقیقه می‌باشد [۱۲].

گیربکس هلیکوپتر نیز همانند سایر گیربکس‌ها از اجتماع تعدادی چرخنده تشکیل یافته با این ویژگی که در آن از چرخنده مخروطی برای تغییر راستای دوران افقی موتور به دوران عمودی ملخ اصلی و از سیستم چرخنده‌ی خورشیدی برای تغییر دور استفاده شده است. مشخصات هندسی چرخنده‌های گیربکس صنعتی موجود در جدول ۱ آمده است.

۴- قیود ضرایب اطمینان خستگی

به منظور اعمال قیود ضرایب اطمینان خستگی گیربکس، معادلات خستگی خمشی و تماسی آگما برای چرخنده‌های مارپیچ و مخروطی به کار برده می‌شوند که به ترتیب در روابط (۴) تا (۷) نشان داده شده‌اند [۱۳ و ۱۴]:

$$S_F = \frac{S_t Y_N Y_J F m_t}{W^t K_O K_V K_S K_H K_B K_T K_R} \quad (4)$$

$$S_H = \frac{S_C Z_N C_H}{Z_E K_T K_R \sqrt{W^t K_O K_V K_S \frac{K_H}{d_p} \frac{Z_R}{Z_I}}} \quad (5)$$

$$S_F = \frac{S_t K_V Y_N F d_G m_t}{2 T_G K_O K_T K_R} \frac{Y_J}{1.2 K_H} \quad (6)$$

$$S_H = \frac{S_C Z_N C_H}{Z_E K_T K_R \sqrt{\frac{2 T_p K_O}{K_V} \frac{1}{F d_G^2} \frac{N_G}{N_P} \frac{1.2 K_H Z_R}{Z_I}}} \quad (7)$$

که در آنها W_t بار مماسی انتقالی، S_t تنش خمشی مجاز، S_c تنش تماسی مجاز، S_F ضریب اطمینان خمشی، S_H ضریب اطمینان تماسی، d_p قطر گام چرخ کوچک، d_G قطر گام چرخ بزرگ، N_P تعداد دنده‌ی چرخ کوچک، N_G تعداد دنده‌ی چرخ بزرگ، T_P گشتاور انتقالی چرخ کوچک و T_G گشتاور انتقالی چرخ بزرگ می‌باشند.

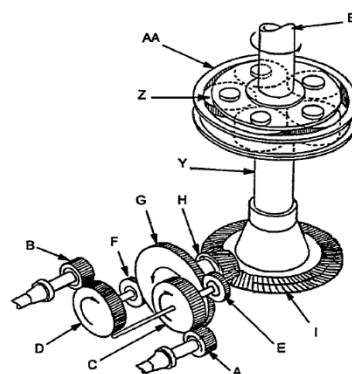
K_V ضریب پویایی، K_S ضریب اندازه، Y_J ضریب هندسی خمشی، Y_N ضریب عمر تنش خمشی، Z_N ضریب عمر تنش تماسی، Z_I ضریب هندسی تماسی و Z_E ضریب کشسان نیز از روابط، نمودارها و جداول موجود در استانداردهای مرجع همچون استاندارد آگما [۱۳ و ۱۴] به دست می‌آیند. دیگر ضرایب موجود در معادلات (۴) تا (۷) در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۲- معرفی ضرایب مفروض در معادلات خستگی

ضریب	مقدار مفروض
ضریب فزونی بار، K_O	۱
ضریب توزیع بار، K_H	۱/۳
ضریب کلفتی طوقه، K_B	۱/۲۹۲
ضریب دمایی، K_T	۱
ضریب اعتمادپذیری، K_R	۱/۲۵
ضریب پرداخت سطح، Z_R	۱/۱
ضریب نسبت سختی، C_H	۱

۵- الگوریتم ژنتیکی باینری

الگوریتم ژنتیکی یک روش جستجو و بهینه‌سازی بر پایه‌ی انتخاب طبیعی است. الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت روش حل را با جمعیت اولیه آغاز می‌کنند که متشکل از مجموعه‌ای از داده‌های تصادفی است. تعداد داده‌های تصادفی برای هر متغیر طراحی برابر با جمعیت انتخاب‌شده توسط کاربر و هر کروموزوم نماینده‌ی یک جواب است؛ در الگوریتم ژنتیکی باینری هر عضو با N_{bits} بیت صفر و یک معادل‌سازی



شکل ۱- طرحواره گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا ۱۲۱ [۱۲]

جدول ۱- مشخصات هندسی چرخنده‌های گیربکس هلیکوپتر آگوستا (نامگذاری چرخنده‌ها مطابق شکل ۱ است) [۱۲]

چرخنده	زیرنویس متغیرهای طراحی	نوع	تعداد دنده
B و A	۱	مارپیچ	۴۱
D و C	۱	مارپیچ	۹۶
F و E	۲	مارپیچ	۴۳
G	۲	مارپیچ	۱۰۹
H	۳	مخروطی مارپیچ	۲۵
I	۳	مخروطی مارپیچ	۸۵
Y	۴	مارپیچ	۵۴
Z	۴	مارپیچ	۷۱
AA	۴	مارپیچ	۱۹۶

۳- تابع هدف جرم

به منظور بهینه‌سازی جرم گیربکس، تابع هدف جرم به صورت مجموع حاصل ضرب حجم اجزا در مقدار چگالی آنها در نظر گرفته شده است. با توجه به تمرکز این پژوهش بر بهینه‌سازی جرم چرخنده‌ها، تابع هدف جرم به صورت مجموع جرم چرخنده‌ها فرض می‌شود. با در نظر گرفتن شکل هندسی چرخنده‌های مارپیچ به صورت استوانه و چرخنده‌های مخروطی به صورت مخروط ناقص از نتایج تحلیل‌های صورت گرفته، توابع جرم چرخنده‌های مارپیچ و مخروطی و تابع هدف جرم گیربکس به ترتیب مطابق روابط (۱) تا (۳) به دست می‌آیند:

$$M_{\text{Helical}} = \frac{\pi}{4} \rho m_t^2 N^2 F \quad (1)$$

$$M_{\text{Spiral Bevel}} = \frac{\pi}{4} \rho F \cos \gamma \times (m_t^2 N^2 + 2 F^2 \sin^2 \gamma - 2 m_t N F \sin \gamma) \quad (2)$$

$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{Z_1} M_{\text{Helical}_i} + \sum_{i=1}^{Z_2} M_{\text{Spiral Bevel}_i} \quad (3)$$

که در آنها F و N به ترتیب معرف چگالی، مدول مایل، تعداد دنده و عرض چرخنده‌ها و γ ، Z_1 و Z_2 به ترتیب بیانگر زاویه‌ی گام چرخنده‌ی مخروطی، تعداد چرخنده‌های مارپیچ و مخروطی و M_{Helical} ، $M_{\text{Spiral Bevel}}$ و M_{total} نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توابع جرم چرخنده‌های مارپیچ، مخروطی و گیربکس می‌باشند.

می‌شود. پس از تشکیل کروموزوم‌ها، با هدف انتقال داده‌های تولیدشده به مبنای ده‌دهی، داده‌ها کدگذاری می‌شوند. روابط ریاضی مورد استفاده برای کدگذاری متغیرها در روابط (۸) و (۹) و روابط مورد استفاده در کدگذاری متغیرها در روابط (۱۰) و (۱۱) ارائه شده‌اند [۱۵]:

$$x_{\text{norm}} = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (۸)$$

$$\text{gene}[m] = \text{round} \left\{ x_{\text{norm}} - 2^{-m} - \sum_{x=1}^{m-1} \text{gene}[x] 2^{-x} \right\} \quad (۹)$$

$$x_{\text{quant}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{gene}}} \text{gene}[m] 2^{-m} + 2^{-(M+1)} \quad (۱۰)$$

$$\lambda_n = x_{\text{quant}} (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min} \quad (۱۱)$$

که در آنها x_{norm} متغیر بی‌بعد (بین صفر و یک)، $\bar{x}$ متغیر حقیقی، $x_{\min}$ مقدار کمینه متغیرها، $x_{\max}$ مقدار بیشینه متغیرها، $\text{gene}[m]$ فرم باینری $\bar{x}$ ، $\text{round}\{\}$ تابع تقریب به نزدیکترین عدد صحیح و λ_n به ترتیب فرم گسسته‌سازی شده x_{norm} و $\bar{x}$ می‌باشند. الگوریتم ژنتیکی باینری با استفاده از بیت‌ها به حل مسئله می‌پردازد. مقادیر گسسته‌سازی شده λ_n یا متغیرها به صورت ریاضی با ضرب کردن بردار بیت‌ها در بردار سطوح گسسته‌سازی به دست می‌آیند [۱۵]:

$$\begin{aligned} \lambda_n &= \text{gene} \times Q^T \\ \text{gene} &= [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N] \\ Q &= [2^{-1} \ 2^{-2} \ \dots \ 2^{-N_{\text{gene}}}] \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که در آنها N_{gene} تعداد بیت‌های هر ژن، b_n بیت‌های باینری (به صورت صفر و یک)، Q بردار گسسته‌سازی و Q^T ترانزپوز بردار Q می‌باشند.

پس از کدگذاری متغیرها، شایستگی هریک از داده‌ها با استفاده از تابع هدف تعیین می‌شود. پس از این مرحله، داده‌ها مرتب شده و قسمتی از داده‌های نامناسب حذف می‌شوند. برای تولید نسل بعدی باید نخست والدین انتخاب شوند. پس از انتخاب والدین، برای تولید داده‌های جدید، داده‌های منتخب باهم جفت می‌شوند. در نهایت برای جلوگیری از همگرایی الگوریتم در کمینه محلی نیز از عملگر جهش استفاده می‌شود. در الگوریتم ژنتیکی باینری این هدف با تغییر بیت‌های صفر به یک و برعکس انجام می‌گیرد. مراحل ذکرشده تا همگرایی به پاسخ ادامه می‌یابد.

۶- الگوریتم اجتماع ذرات باینری

الگوریتم اجتماع ذرات یک روش بهینه‌سازی تکاملی بر مبنای رفتار جمعی افراد در گروه‌های طبیعی بزرگ است [۱۶]. ایده اصلی این الگوریتم از حرکات منظم جمعی پرندگان و ماهی‌ها اقتباس شده و برای مدل‌سازی حرکت جمعی این جانداران دو دیدگاه در نظر گرفته شده‌اند. در دید اول، همه اعضای گروه موظف می‌باشند همواره موقعیت خود را با تبعیت از بهترین فرد گروه تغییر دهند و در دید دوم، لازم است تک‌تک اعضا بهترین موقعیت را که شخصاً تجربه

کرده‌اند در حافظه خود نگه داشته و به سمت بهترین موقعیت در گذشته خود تمایل داشته باشند. این الگوریتم روشی مبتنی بر جمعیت می‌باشد که روش حل خود را با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک "ذره" نامیده می‌شوند، شروع می‌کند. بهترین عنصر جمعیت به عنوان بهترین فرد گروه انتخاب می‌شود. این ذره بسته به قدرتش، ذرات دیگر را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشد. با گذشت زمان، ذرات به بهترین عضو گروه نزدیک‌تر شده و الگوریتم همگرا می‌شود [۱۶ و ۱۷]. در این الگوریتم، ذرات با استفاده از بردارهایی نمایش داده می‌شوند که طول آنها برابر با تعداد متغیرهای طراحی مسئله بوده و هر ذره نماینده یک حل است. ابتدا جمعیت اولیه‌ای از ذرات با مکان تصادفی (x_i^0) و سرعت اولیه‌ی تصادفی (v_i^0) تولید می‌شود. با تعیین شایستگی هریک از ذرات موجود، بهترین حل در مرحله موجود تعیین می‌گردد. پس از آن و برای گام بعدی، مکان و سرعت ذره‌ها به‌نگام‌سازی می‌شوند. سرعت هر ذره بر اساس بهترین پاسخ به دست آمده در گروه ذرات (بهترین عضو گروه) و بهترین مکانی که ذره تاکنون در آن قرار گرفته است تغییر می‌کند. رابطه‌ی (۱۳) معادلات لازم برای این کار را ارائه می‌دهد [۱۶ و ۱۸]:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= \omega v_i^k + \phi_1 (g^k - x_i^k) + \phi_2 (l_i^k - x_i^k) \\ \phi_1 &= r_g \ a_g, \quad \phi_2 = r_l \ a_l \end{aligned} \quad (۱۳)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، l_i^k و g^k به ترتیب بهترین جواب ذره‌ی i ام و بهترین جواب به دست آمده از کل جامعه یا یک همسایگی از آن تا زمان حاضر می‌باشند. همچنین در این رابطه ω ، a_g و a_l به ترتیب نشانگر ضریب اینرسی و فاکتورهای یادگیری و مقادیر r_g و r_l نیز دو عدد تصادفی در بازه‌ی صفر و یک می‌باشند. در الگوریتم اجتماع ذرات باینری بردار موقعیت ذره به صورت باینری ارائه می‌شود. بدین منظور یک متغیر میانی $S(v_{ij}^{k+1})$ به نام تبدیل سیگموئید به کار گرفته می‌شود [۱۶]:

$$S(v_{ij}^{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{ij}^{k+1})} \quad (۱۴)$$

مقدار $S(v_{ij}^{k+1})$ می‌تواند به عنوان آستانه‌ی احتمال تعریف شود و برای عدد تصادفی m_{ij} از بازه‌ی [۰، ۱] می‌توان نوشت [۱۶]:

$$x_{ij}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } m_{ij} < S(v_{ij}^{k+1}) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (۱۵)$$

پس از به دست آوردن سرعت جدید، هر ذره به موقعیت جدید خود منتقل می‌شود. اگر ذره به موقعیت بهتری از بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است برسد، آنگاه موقعیت مذکور به عنوان بهترین مکان ذره (بهترین تجربه‌ی فردی) در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این در صورتی که بهترین پاسخ به دست آمده در این مرحله، از بهترین پاسخ به دست آمده برای کل جامعه بهتر باشد، آنگاه این موقعیت به عنوان بهترین پاسخ به دست آمده برای کل (بهترین تجربه‌ی جمع) نیز در نظر گرفته می‌شود.

۷- الگوریتم جستجوی گرانشی باینری

در این الگوریتم، بهینه‌سازی به کمک طرح قوانین گرانشی و حرکت در یک سیستم مصنوعی با زمان گسسته انجام می‌شود. طبق قانون گرانش، هر جرم، محل و وضعیت سایر اجرام را از طریق نیروی جاذبه‌ی گرانشی درک می‌کند. از این روش می‌توان برای حل هر مسئله‌ی بهینه‌سازی که در آن هر جواب به صورت یک موقعیت در فضا قابل تعریف بوده و میزان تفاوت آن با سایر جواب‌ها به صورت یک فاصله قابل بیان باشد، استفاده نمود. در قدم اول فضای جستجو مشخص می‌شود. هر نقطه از فضا می‌تواند یک جواب مسئله باشد. عوامل جستجوگر مجموعه‌ای از اجرام می‌باشند و هر جرم دارای سه مشخصه‌ی موقعیت جرم، جرم گرانشی و جرم اینرسی می‌باشد. این مفاهیم برگرفته از مفاهیم جرم گرانشی فعال و جرم اینرسی در فیزیک می‌باشند. در فیزیک جرم گرانشی فعال معیاری از میزان شدت نیروی گرانشی حول یک جسم و جرم اینرسی معیاری از مقاومت جسم در مقابل حرکت است. این دو مشخصه ممکن است با یکدیگر برابر نباشند و مقدار آنها با توجه به شایستگی هر جرم تعیین می‌شود. پس از تشکیل سیستم، قوانین حاکم بر آن مشخص می‌شوند. صورت کلی این قوانین، تقریباً شبیه قوانین طبیعت است که به این صورت تعریف شده‌اند:

قانون گرانش: در فضای موجود، هر جرم تمام اجرام دیگر را به سمت خود جذب می‌کند. مقدار این نیرو متناسب با جرم گرانشی و عکس فاصله‌ی آن دو جرم می‌باشد.

قوانین حرکت: سرعت فعلی هر جرم برابر با مجموع ضربی از سرعت قبلی جرم و تغییر سرعت آن می‌باشد. تغییر سرعت با شتاب هر جرم نیز برابر با نیروی وارد بر آن تقسیم بر جرم اینرسی است. حال فضای جستجو به صورت مجموعه‌ای از N جرم در نظر گرفته می‌شود که هر کدام به عنوان پاسخی برای مسئله فرض شده است. موقعیت جرم i ام با رابطه‌ی (۱۶) نمایش داده می‌شود [۱۹]:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^D), \quad d=1, 2, \dots, D \text{ and } i=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

که در آن D تعداد متغیرها بوده و ابعاد فضا را مشخص می‌کند. در سیستم ذرات موجود، در زمان مجازی t ، از سوی تمامی ذرات به ذره‌ی i ام نیرو وارد می‌شود. مقدار نیروی وارد از ذره‌ی j ام به ذره‌ی i ام در جهت بُعد d ام با $F_{ij}^d(t)$ نمایش داده می‌شود. مقدار این نیرو توسط رابطه‌ی (۱۷) تعیین می‌شود [۱۹]:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{aj}(t) \times M_{pi}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (17)$$

که در آن، $G(t)$ ، $M_{aj}(t)$ ، $M_{pi}(t)$ و $R_{ij}(t)$ به ترتیب ثابت گرانش در زمان t ، جرم گرانشی فعال ذره‌ی j ام، جرم گرانشی غیرفعال ذره‌ی i ام و فاصله‌ی بین دو جرم i و j می‌باشند. همچنین در این رابطه ε برابر مقداری بسیار کوچک است. در الگوریتم جستجوی گرانشی باینری به جای فاصله‌ی اقلیدسی از فاصله‌ی همینگ (hamming distance) استفاده می‌شود. فاصله‌ی اقلیدسی بیانگر اختلاف میان مقادیر یک کمیت در دو اندازه‌گیری مختلف است اما فاصله‌ی همینگ مشخص‌کننده‌ی تعداد مکان‌های متناظر با مقادیر نابرابر در فضای باینری می‌باشد.

همچنین رابطه‌ی G به فرم رابطه‌ی (۱۸) به صورت خطی کاهش می‌یابد [۲۰]:

$$G(t) = G_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (18)$$

که در آن، G_0 برابر ۱۰۰ و T تعداد کل نسل‌های حل می‌باشند. نیروی برآیند وارد بر ذره‌ی i ام در جهت بُعد d با رابطه‌ی (۱۹) قابل بیان است [۱۹]:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N r_j F_{ij}^d(t) \quad (19)$$

که در آن، r_j مقداری تصادفی بین صفر و یک است.

مطابق قانون دوم نیوتن شتاب هر ذره در جهت بُعد d برابر نسبت نیروی وارد بر جرم ذره است که با رابطه‌ی (۲۰) قابل بیان است [۱۹]:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}} \quad (20)$$

که در آن M_{ii} جرم اینرسی ذره i ام می‌باشد.

از آنجایی که V_i^d در الگوریتم باینری باید به صورت تابع احتمال تعریف شود، لذا $S(V_i^d)$ باید در بازه‌ی $[0, 1]$ محدود گردد که به این منظور از رابطه‌ی (۲۱) استفاده می‌شود [۲۰]:

$$S(V_i^d(t)) = \left| \tanh(V_i^d(t)) \right| \quad (21)$$

پس از محاسبه‌ی تابع احتمال از رابطه‌ی (۲۱)، جرم در هر بُعد مطابق با رابطه‌ی (۲۲) حرکت می‌کند. طبق این رابطه، جرم با یک احتمال تغییر موقعیت می‌دهد که هرچه سرعت جرم در یک بُعد بیشتر باشد، احتمال حرکت جرم در آن بُعد بیشتر می‌شود [۲۰]:

$$\text{if rand} < S(V_i^d(t+1)) \text{ then} \\ x_i^d(t+1) = \text{complement}(x_i^d(t)) \quad (22)$$

$$\text{else } x_i^d(t+1) = x_i^d(t)$$

که در آن rand عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی $[0, 1]$ می‌باشد. در مراحل الگوریتم، مقادیر ذیل با چنین روابطی به هنگام‌سازی می‌شوند [۱۹]:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (23)$$

$$m_i(t) = \frac{\text{fit}_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad (24)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (25)$$

که در آن، $\text{fit}_i(t)$ مقدار برازندگی ذره‌ی i ام را در زمان t نشان می‌دهد. برای یک مسئله‌ی کمینه‌سازی مقادیر $\text{best}(t)$ و $\text{worst}(t)$ با روابط (۲۶) و (۲۷) تعریف می‌شوند [۱۹]:

$$\text{best}(t) = \min \text{fit}_j(t), \quad j=1, 2, \dots, N \quad (26)$$

$$\text{worst}(t) = \max \text{fit}_j(t), \quad j=1, 2, \dots, N \quad (27)$$

۸- فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی

کمینه‌سازی جرم گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا با اعمال قیود مختلف هندسی و ضرایب اطمینان خستگی مطلوب انجام شده است. نکته 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 چرخنده‌ی خاصی محدودکننده‌ی قید خستگی نباشد. رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) به ترتیب تابع هدف موجود و قیود حاکم بر مسئله‌ی بهینه‌سازی را بیان می‌کنند:

$$J^{(1)} = \text{minimize} \sum_{i=1}^z M_{Gear_i} = \text{minimize} M_{total} \quad (28)$$

$$g_1: \min(SF) \geq SF_d$$

$$g_2: \min(SH) \geq SH_d$$

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

$$g_4: F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$$

برای اعمال قیود نامساوی مطرح‌شده در موارد g_1 تا g_4 تابع جریمه $\hat{J}$ (penalty function) به کار رفته است. رابطه‌ی (۳۱) چگونگی کاربرد تابع جریمه برای اعمال قید نمونه به صورت رابطه‌ی (۳۰) را نشان می‌دهد:

$$g(x) \geq g_0 \quad (30)$$

$$\hat{J} = \bar{J} + \kappa \max \{0, \pm[g_0 - g(x)]\} \quad (31)$$

که در آنها x بردار ورودی و g_0 مقدار حدی قید است. همچنین κ نشان‌دهنده‌ی مقدار جریمه می‌باشد که عددی بزرگ انتخاب می‌شود. برای قیود g_1 و g_2 مقدار ضریب اطمینان قابل قبول خستگی خمشی و تماسی برابر یا بزرگتر از $1/1$ فرض شده‌اند. قیود g_3 و g_4 نیز که بر روی متغیرهای طراحی اعمال می‌شوند به ترتیب بر اساس رابطه‌های (۳۲) و (۳۳) فرض می‌شوند:

$$m_n \in \{2, 2.25, 2.5, 2.75, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (32)$$

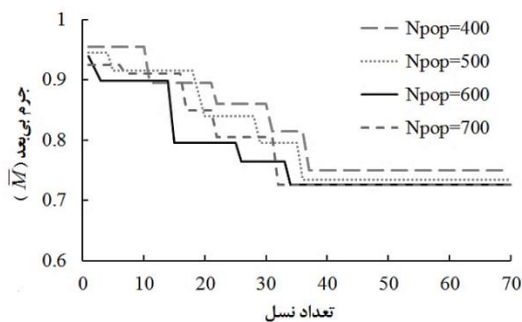
$$30 \text{ mm} \leq F \leq 200 \text{ mm} \quad (33)$$

لازم به ذکر است که مقادیر مدول عمودی ارائه‌شده در رابطه‌ی (۳۲) از مجموعه‌ی مدول‌های مرجع استاندارد [۱۳ و ۱۴] انتخاب شده‌اند.

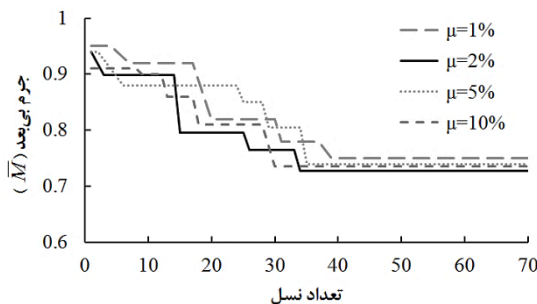
۹- نتایج

با کاربرد هر سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی، پاسخ‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن برای گیربکسی با مشخصات ذکرشده به دست آمده‌اند. طی فرایند حل مسئله، زاویه‌ی فشار و مارپیچ برای چرخنده‌های مارپیچ به ترتیب برابر ۲۰ و ۳۰ درجه و برای چرخنده‌های مخروطی مارپیچ به ترتیب برابر ۲۰ و ۳۵ درجه فرض شده‌اند. همچنین چرخنده‌ها از فولاد AISI ۹۳۱۰ ساخته شده‌اند که دارای مقاومت خمشی مجاز ۵۰۷ مگاپاسکال و مقاومت تماسی مجاز ۱۹۷۷

مگاپاسکال می‌باشد. به منظور تعیین مقادیر مناسب پارامترهای بهینه‌سازی همچون تعداد نسل و تعداد جمعیت، مقادیر مختلفی برای این پارامترها در هر سه روش بهینه‌سازی لحاظ شده است. برای انتخاب تعداد جمعیت و تعداد نسل مقادیری برگزیده شده‌اند که به ازای آنها جواب بهینه نهایی، بهترین (کمینه‌ترین) جواب مسئله بوده و با افزایش تعداد جمعیت و تعداد نسل دیگر بهبودی در جواب بهینه نهایی مشاهده نمی‌شود. نرخ جهش انتخابی نیز عملاً با توجه به حل‌های مختلف صورت گرفته برای هر سه روش صورت گرفته و مقداری برگزیده شده است که به ازای آن، مقدار تابع هدف کمینه‌ترین مقدار ممکن باشد. شکل‌های ۲ و ۳ یک نمونه از روند انتخاب مقادیر مناسب برای تعداد جمعیت و نرخ جهش برای روش‌های بهینه‌سازی را نشان می‌دهند. در نهایت با اشتراک‌گیری بین مقادیر به دست آمده برای هر سه روش، در تمامی بهینه‌سازی‌های صورت گرفته، تعداد جمعیت برابر با ۶۰۰، تعداد نسل برابر با ۷۰، نرخ جهش برابر با دو درصد (۰/۰۲) و تعداد بیت برای هر کروموزوم برابر با ۴۸ در نظر گرفته شده‌اند. پس از تعیین این مقادیر، به منظور اطمینان از تکرارپذیری جواب بهینه نهایی حل مسئله با استفاده از هر یک از روش‌ها، ۱۰ بار تکرار شده است.



شکل ۲- تغییرات مقدار تابع هدف جرم بی‌بعد با تعداد نسل برای بهترین عضو جمعیت به ازای تعداد جمعیت‌های مختلف



شکل ۳- تغییرات مقدار تابع هدف جرم بی‌بعد با تعداد نسل برای بهترین عضو جمعیت به ازای نرخ‌های جهش مختلف

به منظور اختصار تنها به ارائه‌ی بهترین نتایج به دست آمده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف به ازای چند نمونه از ضرایب جریمه‌ای که تمامی قیود حاکم بر مسئله را به طور کامل ارضا نموده‌اند، اکتفا می‌شود. نتایج به دست آمده برای الگوریتم‌های ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی به ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۵ خلاصه شده‌اند. در هر مورد نیز بهینه‌ترین جواب به عنوان طرح انتخابی و پاسخ نهایی الگوریتم مشخص شده است.

جدول ۳- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیکی

به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه				
K_1	K_2	تعداد نسل تا همگرایی	جرم گیربکس (kg)	طرح انتخابی
۵	۷	۳۹	۲۱۷/۰۵	
۵	۱۰	۳۷	۲۱۶/۷۱	✓
۷	۱۵	۴۶	۲۲۰/۴۷	
۱۰	۱۵	۳۷	۲۱۷/۳۰	

جدول ۴- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم اجتماع ذرات

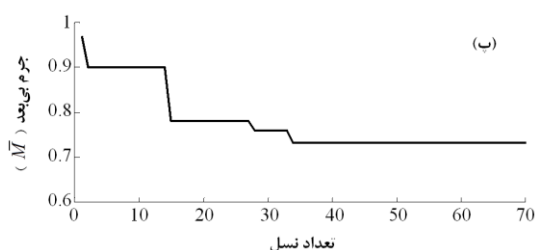
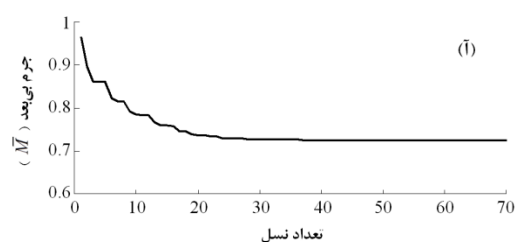
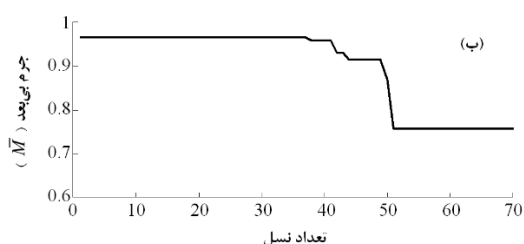
به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه				
K_1	K_2	تعداد نسل تا همگرایی	جرم گیربکس (kg)	طرح انتخابی
۵	۷	۵۱	۲۴۲/۸۲	
۵	۱۰	۵۴	۲۶۷/۵۸	
۷	۱۵	۵۱	۲۲۹/۹۷	✓
۱۰	۱۵	۶۵	۲۴۴/۲۶	

جدول ۵- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم جستجوی گرانشی

به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه				
K_1	K_2	تعداد نسل تا همگرایی	جرم گیربکس (kg)	طرح انتخابی
۵	۷	۳۹	۲۲۴/۴۴	
۵	۱۰	۴۲	۲۲۸/۶۴	
۷	۱۵	۳۴	۲۱۶/۴۶	✓
۱۰	۱۵	۳۷	۲۱۹/۲۳	

شکل ۴ نمودارهای سرعت همگرایی مربوط به طرح‌های انتخابی هر سه روش را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. در این شکل تابع هدف جرم بر اساس جرم کل چرخنده‌های گیربکس موجود در هلیکوپتر آگوستا بی‌بعدسازی شده است.

در جدول ۶، مقادیر متغیرهای طراحی برای طرح‌های انتخابی هر سه روش و میزان کاهش جرم گیربکس اصلی در مقایسه با یکدیگر و نیز طرح گیربکس موجود صنعتی به‌کار رفته در هلیکوپتر آگوستا ارائه شده‌اند. در این جدول، زیرنویس‌های عددی متغیرهای طراحی به‌ترتیب مربوط به جفت چرخنده‌های درگیر از ورودی تا خروجی گیربکس می‌باشند.



شکل ۴- نمودار سرعت همگرایی جواب بهینه‌ی انتخابی

(آ) الگوریتم ژنتیکی (ب) الگوریتم اجتماع ذرات

(پ) الگوریتم جستجوی گرانشی

جدول ۶- مقادیر متغیرهای طراحی به‌دست‌آمده برای طرح‌های انتخابی در مقایسه با طرح صنعتی موجود

مبنای انتخاب طرح	m_1 (mm)	m_2 (mm)	m_3 (mm)	m_4 (mm)	F_1 (mm)	F_2 (mm)	F_3 (mm)	F_4 (mm)	جرم گیربکس (kg)	میزان کاهش جرم (%)
طرح صنعتی موجود	۲	۲/۷۵	۷	۳	۵۹/۰۶	۶۸/۲۵	۹۵/۶۱	۸۷/۲۵	۲۹۷/۸۶	-
الگوریتم ژنتیکی	۲	۲/۲۵	۷	۳	۴۰/۱۸	۴۲/۴۶	۹۵/۶۰	۶۴/۴۸	۲۱۶/۷۱	۲۷/۲۴
الگوریتم اجتماع ذرات	۲	۲	۷	۳	۴۰	۵۲/۶۹	۱۰۵/۹۵	۷۰/۵۶	۲۲۹/۹۷	۲۲/۷۹
الگوریتم جستجوی گرانشی	۲	۲/۲۵	۷	۳	۴۰	۴۰/۵۰	۹۶/۵۶	۶۴/۹۱	۲۱۶/۴۶	۲۷/۳۳

- [10] Mermoz E., Astoul J., Sartor M., Linares J. M., and Bernard A., A new methodology to optimize spiral bevel gear topography. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1, pp. 119-122, 2013.
- [11] Rao R. V., *Design Optimization of a Spur Gear Train Using TLBO and ETLBO Algorithms*. Teaching Learning Based Optimization Algorithm. Springer International Publishing, pp. 91-101, 2016.
- [12] Jammu V. B., Danai K., and Lewicki D., Structure-based connectionist network for fault diagnosis of helicopter gearboxes. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 120, No. 1, pp. 100-105, 1998.
- [13] Standard, A., *Fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gear teeth*. ANSI/AGMA-B88, 2001.
- [14] Standard, A., *Design Manual for Bevel Gears*. ANSI/AGMA 2005-D03, 2005.
- [15] Haupt R.L. and Haupt S.E., *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons, 2004.
- [16] Panigrahi B. K., Hiot L. M., and Shi Y., *Handbook of swarm intelligence: concepts, principles and applications*. Vol. 8, Springer, 2010.
- [17] Clerc M., *Particle swarm optimization*. Vol. 93, John Wiley & Sons, 2010.
- [18] Perez R. and Behdinan K., Particle swarm approach for structural design optimization. *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 19, pp. 1579-1588, 2007.
- [19] Rashedi E., Nezamabadi-Pour H., and Saryazdi S., GSA: a gravitational search algorithm. *Information sciences*, Vol. 179, No. 13, pp. 2232-2248, 2009.
- [20] Rashedi E., Nezamabadi-Pour H., and Saryazdi S., BGSA: binary gravitational search algorithm. *Natural Computing*, Vol. 9, No. 3, pp. 727-745, 2010.

هرچند نتایج حاکی از موفقیت هر سه روش در کمینه‌سازی وزن گیربکس هستند اما همانطور که در شکل ۴ و جدول ۶ نیز مشاهده می‌شود الگوریتم جستجوی گرانشی علاوه بر اینکه طرح بهینه‌تری از نظر دقت پاسخ ارائه نموده، از نظر سرعت همگرایی نیز نسبت به دو روش دیگر عملکرد بهتری داشته و در تعداد نسل‌های کمتری به جواب رسیده است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از سه روش مختلف بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی برای کمینه‌سازی جرم گیربکس اصلی هلیکوپتر آگوستا استفاده شده است. تابع هدف، مجموع جرم چرخنده‌ها بوده و قیود مختلف از جمله شرایط و محدودیت‌های هندسی و ضرایب اطمینان مناسب بر اساس معیار خستگی در آن اعمال شده‌اند. در این راستا، کارایی روش‌های بهینه‌سازی مذکور مقایسه شده و نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم جستجوی گرانشی علاوه بر اینکه طرح بهینه‌تری از نظر دقت پاسخ ارائه نموده، از نظر سرعت همگرایی نیز نسبت به دو روش دیگر عملکرد بهتری داشته و در تعداد نسل‌های کمتری به جواب رسیده است. علاوه بر آن، نتایج نشان می‌دهند که در بهترین حالت، وزن گیربکس ۲۷/۳۳ درصد نسبت به طرح صنعتی موجود کاهش می‌یابد.

۱۱- مراجع

- [1] Ognjanovic M., Decisions in gear train transmission design. *Research in Engineering Design*, Vol. 8, No. 3, pp. 178-187, 1996.
- [2] Yokota T., Taguchi T., and Gen M., 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] Chong T. H. and Lee J. S., A Design Method of Gear Trains Using a Genetic Algorithm. *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2000.
- [4] Barbieri M., Bonowi G., Scagliarini G., and Pellicano F., Gear vibration reduction using genetic algorithms. In *12th IFToMM World Congress*, Besancon, France, 2007.
- [5] Savsani V., Rao R., and Vakharia D., 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] Tudose L., Buiga O., Ștefanache C., and Söbester A., Automated optimal design of a two-stage helical gear reducer. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 42, No. 3, pp. 429-435, 2010.
- [7] Mendi F., Başkal T., Boran K., and Boran F. E., Optimization of module, shaft diameter and rolling bearing for spur gear through genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 12, pp. 8058-8064, 2010.
- [8] Jeon E. C., Lee S. Y., Song H. B., Chun J. D., and Kim S. Y., Study for the verification of the tooth profile accuracy of the automatic gear design program. *Global Journal of Technology and Optimization*, Vol. 2, No. 97, 2011.
- [9] Sun Y., and Xiong H. G., Optimal Design of Gear Based on Quantum Genetic Algorithm. *Sensors & Transducers*, Vol. 16, pp. 137, 2012.