

## 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. به‌عنوان 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 به‌عنوان پارامتری پیوسته و مدول عمودی آنها به‌عنوان پارامتری گسسته می‌باشند. هرچند 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 نه‌تنها بهترین جواب بهینه از نظر وزن را به‌دست 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 گسترده‌ی 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 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) به‌منظور جلوگیری از آسیب نوک

ملخ، کاهش صدا و افزایش گشتاور آن می‌باشد. به‌دلیل 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. به‌همین 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

جدید به منظور بهینه‌سازی چرخنده‌های مخروطی ماریچ 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 ارائه‌شده 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 هر یک 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.

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 ارائه‌شده 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 به منظور 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 ماریچ 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 ارائه‌شده با توجه به خطای موجود در انتقال قدرت استاتیکی مورد ارزیابی قرار گیرند. ساوانی 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 به منظور 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 ماریچ ارائه کرده‌اند. در پژوهش آنان برای بهینه‌سازی طرح از یک الگوریتم تکاملی تقویت‌شده‌ی 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 ماریچ 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 زیانگ [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

#### 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]:

$$S_F = \frac{S_t Y_N Y_J F m_t}{W^t K_o K_v K_s K_H K_B K_T K_R} \quad (4)$$

$$S_H = \frac{S_C Z_N C_H}{Z_E K_T K_R \sqrt{W^t K_o K_v K_s \frac{K_H}{d_p} \frac{Z_R}{F} \frac{Z_I}{Z_I}}} \quad (5)$$

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

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

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.

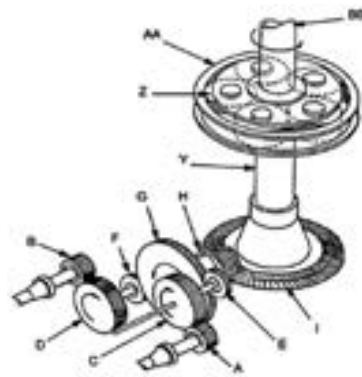
$K_v$  ضریب پویایی،  $K_s$  ضریب اندازه،  $Y$  ضریب هندسی خمشی،  $Y_N$  ضریب عمر تنش خمشی،  $Z_N$  ضریب عمر تنش تماسی،  $Z_I$  ضریب هندسی تماسی و  $Z_E$  ضریب کشسان نیز از روابط، نمودارها و جداول موجود در استانداردهای مرجع همچون استاندارد آگما [۱۳ و ۱۴] به دست می‌آیند. دیگر ضرایب موجود در معادلات (۴)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

جدول ۲- معرفی ضرایب مفروض در معادلات خستگی

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

#### 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 انتخاب شده 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 ۳۳۰ [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:

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

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

$$M_{total} = \sum_{i=1}^{Z_1} M_{Helical_i} + \sum_{i=1}^{Z_2} M_{Spiral Bevel_i} \quad (3)$$

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

کرده‌اند در حافظه خود نگه داشته و به سمت بهترین موقعیت در گذشته‌ی 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 به‌عنوان 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 به‌بهترین 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 نماینده‌ی 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 هر یک از ذرات موجود، بهترین حل در مرحله‌ی موجود تعیین می‌گردد. پس از آن و برای گام بعدی، مکان و سرعت ذره‌ها به‌هنگام‌سازی می‌شوند. سرعت هر ذره براساس بهترین پاسخ به‌دست‌آمده 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]:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + \phi_1 (g^k - x_i^k) + \phi_2 (l_i^k - x_i^k) \quad (13)$$

$$\phi_1 = r_g a_g, \quad \phi_2 = r_l a_l$$

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

$$S(v_{ij}^{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{ij}^{k+1})} \quad (14)$$

مقدار  $S(v_{ij}^{k+1})$  می‌تواند به‌عنوان آستانه‌ی احتمال تعریف شود و برای عدد تصادفی  $m_{ij}$  از بازه‌ی  $[0, 1]$  می‌توان نوشت [۱۶]:

$$x_{ij}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } m_{ij} < S(v_{ij}^{k+1}) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

پس از به‌دست 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 به‌عنوان بهترین مکان ذره (بهترین تجربه‌ی فردی) در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این در صورتی که بهترین پاسخ به‌دست‌آمده در این مرحله، از بهترین پاسخ به‌دست‌آمده برای کل جامعه بهتر باشد، آنگاه این موقعیت به‌عنوان بهترین پاسخ به‌دست‌آمده برای کل (بهترین تجربه‌ی جمع) نیز در نظر گرفته می‌شود.

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

$$x_{\text{norm}} = \frac{\bar{x} - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (8)$$

$$\text{gene}[m] = \text{round} \left\{ x_{\text{norm}} \cdot 2^{-m} - \sum_{x=1}^{m-1} \text{gene}[x] \cdot 2^{-x} \right\} \quad (9)$$

$$x_{\text{quant}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{gene}}} \text{gene}[m] \cdot 2^{-m} + 2^{-(M+1)} \quad (10)$$

$$\lambda_n = x_{\text{quant}} (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) + x_{\text{min}} \quad (11)$$

که در آنها  $x_{\text{norm}}$  متغیر بی‌بعد (بین صفر و یک)،  $\bar{x}$  متغیر حقیقی،  $x_{\text{min}}$  مقدار کمینه‌ی متغیرها،  $x_{\text{max}}$  مقدار بیشینه‌ی متغیرها،  $\text{gene}[m]$  فرم باینری  $\bar{x}$ ،  $\text{round}\{\}$  تابع تقریب به نزدیکترین عدد صحیح و  $x_{\text{quant}}$  و  $\lambda_n$  به‌ترتیب فرم گسسته‌سازی شده‌ی  $x_{\text{norm}}$  و  $\bar{x}$  می‌باشند. الگوریتم ژنتیکی باینری با استفاده از بیتها به حل مسئله می‌پردازد. مقادیر گسسته‌سازی شده‌ی ژن یا متغیرها به‌صورت ریاضی با ضرب کردن بردار بیتها در بردار سطوح گسسته‌سازی به‌دست می‌آیند [۱۵]:

$$\lambda_n = \text{gene} \times Q^T$$

$$\text{gene} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N]$$

$$Q = [2^{-1} \ 2^{-2} \ \dots \ 2^{-N_{\text{gene}}}] \quad (12)$$

که در آنها  $N_{\text{gene}}$  تعداد بیت‌های هر ژن،  $b_n$  بیت‌های باینری (به‌صورت صفر و یک)،  $Q$  بردار گسسته‌سازی و  $Q^T$  ترانهاده‌ی بردار  $Q$  می‌باشند.

پس از کدگشایی متغیرها، شایستگی هر یک 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 کمینه‌ی 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]. ایده‌ی 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، همه‌ی 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

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]:

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

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

که در آن  $\text{rand}$  عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی  $[0, 1]$  می‌باشد. در مراحل الگوریتم، مقادیر ذیل با چنین روابطی به‌هنگام‌سازی 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 (۲۴) و (۲۵) تعریف می‌شوند [۱۹]:

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

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

## 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]:

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

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]:

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

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  $\epsilon$  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.

### 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<sub>d</sub>) برای محاسبات ضریب اطمینان خستگی خمشی و SH<sub>d</sub> 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:

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

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

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

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

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

برای اعمال قیود نامساوی مطرح‌شده در موارد  $g_1$  تا  $g_4$  تابع جریمه  $J$  (penalty function) به‌کار رفته است. رابطه‌ی (۳۱) چگونگی کاربرد تابع جریمه برای اعمال قید نمونه به‌صورت 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  $\kappa$  نشان‌دهنده‌ی مقدار جریمه می‌باشد که عددی بزرگ انتخاب می‌شود. برای قیود  $g_1$  و  $g_2$  مقدار ضریب اطمینان قابل‌قبول خستگی خمشی و تماسی برابر یا بزرگتر از ۱/۱ فرض شده‌اند. قیود  $g_3$  و  $g_4$  نیز که بر روی متغیرهای طراحی اعمال می‌شوند به‌ترتیب بر اساس رابطه‌های (۳۲) و (۳۳) فرض می‌شوند:

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

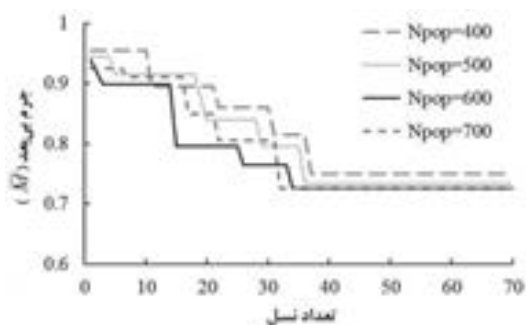
$$30 \text{ mm} \leq F \leq 200 \text{ mm} \quad (33)$$

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

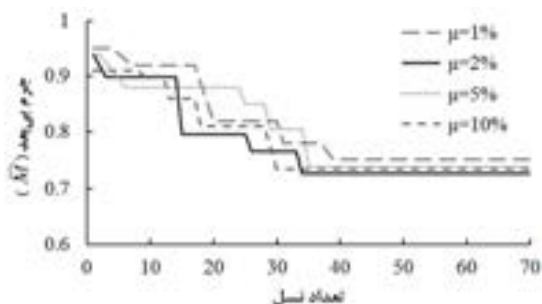
### ۹- نتایج

با کاربرد هر سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی، پاسخ‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی وزن برای گیربکسی با مشخصات ذکرشده به‌دست آمده‌اند. طی فرایند حل مسئله، زاویه‌ی فشار و مارپیچ برای چرخنده‌های مارپیچ به‌ترتیب برابر ۲۰ و ۳۰ درجه و برای چرخنده‌های مخروطی مارپیچ به‌ترتیب 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. به‌منظور 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 به‌ازای آنها جواب بهینه‌ی نهایی، بهترین (کمینه‌ترین) جواب مسئله بوده و با افزایش تعداد جمعیت و تعداد نسل دیگر بهبودی در جواب بهینه‌ی نهایی مشاهده نمی‌شود. نرخ جهش انتخابی نیز عملاً با توجه به حل‌های مختلف صورت‌گرفته برای هر سه روش صورت گرفته و مقداری برگزیده شده است که به‌ازای 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 به‌دست‌آمده برای هر سه روش، در تمامی بهینه‌سازی‌های صورت‌گرفته، 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، به‌منظور اطمینان از تکرارپذیری جواب بهینه‌ی 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 به‌ازای تعداد جمعیت‌های مختلف



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

به‌منظور اختصار تنها به‌ارائه‌ی بهترین نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف به‌ازای چند نمونه از ضرایب جریمه‌ای که تمامی قیود حاکم بر مسئله را به‌طور کامل ارضا نموده‌اند، اکتفا می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده برای الگوریتم‌های ژنتیکی، الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم جستجوی گرانشی به‌ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۵ خلاصه شده‌اند. در هر مورد نیز بهینه‌ترین جواب به‌عنوان طرح انتخابی و پاسخ نهایی الگوریتم مشخص شده است.

جدول ۵- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم جستجوی گرانشی

به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه

طرح انتخابی	جرم گیربکس (kg)	تعداد نسل تا همگرایی	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>
	۲۲۴/۴۴	۳۹	۷	۵
	۲۲۸/۶۴	۴۲	۱۰	۵
✓	۲۱۶/۴۶	۳۴	۱۵	۷
	۲۱۹/۲۳	۳۷	۱۵	۱۰

جدول ۳- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیکی

به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه

طرح انتخابی	جرم گیربکس (kg)	تعداد نسل تا همگرایی	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>
	۲۱۷/۰۵	۳۹	۷	۵
✓	۲۱۶/۷۱	۳۷	۱۰	۵
	۲۲۰/۴۷	۴۶	۱۵	۷
	۲۱۷/۳۰	۳۷	۱۵	۱۰

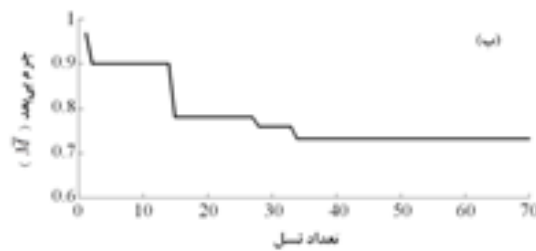
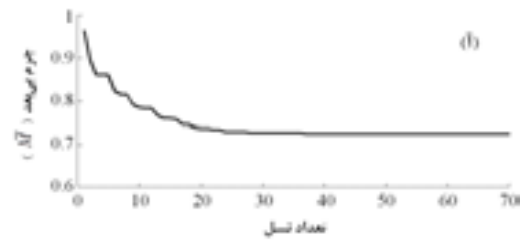
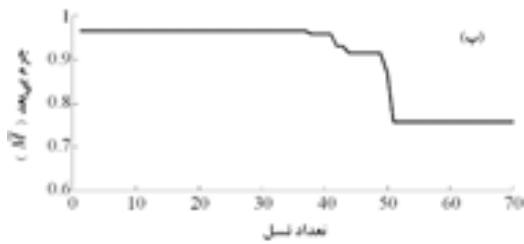
جدول ۴- نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم اجتماع ذرات

به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب جریمه

طرح انتخابی	جرم گیربکس (kg)	تعداد نسل تا همگرایی	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>
	۲۴۲/۸۲	۵۱	۷	۵
	۲۶۷/۵۸	۵۴	۱۰	۵
✓	۲۲۹/۹۷	۵۱	۱۵	۷
	۲۴۴/۲۶	۶۵	۱۵	۱۰

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

میزان کاهش جرم (%)	جرم گیربکس (kg)	F <sub>4</sub> (mm)	F <sub>3</sub> (mm)	F <sub>2</sub> (mm)	F <sub>1</sub> (mm)	m <sub>4</sub> (mm)	m <sub>3</sub> (mm)	m <sub>2</sub> (mm)	m <sub>1</sub> (mm)	مبنای انتخاب طرح
-	۲۹۷/۸۶	۸۷/۲۵	۹۵/۶۱	۶۸/۲۵	۵۹/۰۶	۳	۷	۲/۷۵	۲	طرح صنعتی موجود
۲۷/۲۴	۲۱۶/۷۱	۶۴/۴۸	۹۵/۶۰	۴۲/۴۶	۴۰/۱۸	۳	۷	۲/۲۵	۲	الگوریتم ژنتیکی
۲۲/۷۹	۲۲۹/۹۷	۷۰/۵۶	۱۰۵/۹۵	۵۲/۶۹	۴۰	۳	۷	۲	۲	الگوریتم اجتماع ذرات
۲۷/۲۳	۲۱۶/۴۶	۶۴/۹۱	۹۶/۵۶	۴۰/۵۰	۴۰	۳	۷	۲/۲۵	۲	الگوریتم جستجوی گرانشی

- [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 چرخ‌دنده‌ها 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.