بهینه‌سازی وزن و توان چرخ‌دنده‌های ساده به کمک روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری و روش‌های اجزا محدود

محمد صادقی[۱]، علی سعداله [*۱]

۱.گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

[*] نویسنده مسول: sadollah@usc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

چرخ‌دنده‌ها یکی از پرکاربردترین اجزای انتقال و یا تغییر قدرت محسوب می‌شوند که به وفور در صنعت به چشم می‌خورند. در طراحی چرخ‌دنده ها، متغیرهای وزن، اندازه و راندمان از عوامل مهم و تاثیرگذار در یک طراحی بهینه محسوب می‌شوند، هرچند این عوامل گاهی در تضاد با یکدیگر هستند. از این رو اهمیت بهینه‌سازی در چرخ‌دنده‌ها امری ضروری قلمداد می‌شود. امروزه با توسعه رایانه‌ها و گسترش نرم افزارهای مهندسی در علم مکانیک می‌توان در هزینه و در ساخت این چرخ‌دنده‌ها پیشرفت قابل توجه ای کرد. چرخ‌دنده مورد نظر در این تحقیق از نوع چرخ‌دنده ساده است که البته این تحقیق قابلیت بسط به انواع دیگر چرخ‌دنده‌ها را داراست. در این مقاله از نرم افزار اجزا محدود انسیس و زبان برنامه نویسی متلب جهت مدل‌سازی و بهینه‌سازی چرخدنده ساده استفاده شده است. در این مطالعه، هدف افزایش بیشترین توان با کمترین وزن ممکن است. متغیرهای طراحی در این مقاله، توان، تعداد دندانه، مدول، و ضخامت چرخ‌دنده هستند که به بهینه‌ترین شکل ممکن با نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی شده‌اند و سپس با نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل مهندسی می شوند. در این میان، قیودی مانند قیود مربوط به تنش‌های موجود، مدول، فاصله دو محور چرخ‌دنده، راندمان، و ضرایب اطمینان نیز در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حاصله از برنامه نویسی با خطای بسیار کمی نتایج حاصله از نرم افزار مهندسی را تایید می‌کند که این مهم مبین قابل قبول بودن مدل ریاضی ارایه شده در این مقاله است.

کلمات کلیدی: چرخ‌دنده ساده، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، الگوریتم چرخه آب، الگوریتم شبکه عصبی.

مقدمه

موضوع محوری مقاله پیرامون چرخ‌دنده ساده است که ساده‌ترین و پرکاربردترین نوع چرخ‌دنده است. این نوع از چرخ‌دنده‌ها از متداول‌ترین نوع چرخ‌دنده‌ها هستند که استفاده بسیار زیادی در ساخت گیربکس‌ها دارند. در برخی طراحی‌ها، از تعداد زیادی از این چرخ‌دنده‌ها برای کاهش توان استفاده می‌شود. به طور کلی چرخ‌دنده کوچکتر را که نقشه محرک را ایفا می‌کند و توان را با استفاده از دندانه‌ها به چرخ‌دنده بزرگ منتقل می‌کند را پینیون می‌گویند. در واقع اکثر محاسبات و تحلیل‌ها روی آن انجام می‌شود و این موضوع به این خاطر است که پینیون به علت کوچکی نسبت به چرخ‌دنده بزرگ متحمل تعداد چرخش‌های بیشتر و در پی آن متحمل تنش بیشتری می‌شود که باعث بحرانی‌تر شدن آن در مقابل چرخ‌دنده بزرگ می‌شود [۲،۱].

بهینه‌سازی روشی برای رسیدن به بهترین جواب ممکن برای مسئله با در نظرگرفتن قیود مختلف است که البته لزوما همه روش‌های بهینه‌سازی به یک جواب واحد هدایت نمی‌شوند و در شرایط مختلف جواب‌های مختلفی حاصل می‌گردد[۳]. برای یافتن پاسخ بهینه یک مسئله ممکن است الگوریتم های کلاسیک قدیمی کارامد نباشند و به نتایج نزدیک به واقعیت نرسند، به همین دلیل بهتر است از الگوریتم‌های جدیدتر (فراابتکاری) استفاده نمود. یکی از این روش‌های مدرن بهینه‌سازی استفاده از الگوریتم‌های

فراابتکاری است که اساس این دست الگوریتم‌ها الهام از پدیده‌ها و سیستم‌های طبیعی است[۴]. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم شبکه عصبی و چرخه آب اشاره کرد که در این مقاله از آنها بهره گرفته شده است.

در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده پیرامون مبحث بهینه‌سازی چرخ‌دنده‌ها پرداخته می‌گردد. طراحی بهینه چرخ‌دنده بشکه‌ای دندانه صاف با در نظرگرفتن حجم مواد استفاده شده در آن توسط ذولفقاری[۵] پیشنهاد داده شد که در آن از یکی از روش‌های الگوریتم فراابتکاری یعنی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. ساسانی[۶] بهینه‌سازی برای مدل ساده و چند هدفه چرخ دنده ساده را ارائه نمود که در آن از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. همچنین، حسینی اصل و جعفری فشارکی[۷] بهینه‌سازی جعبه‌دنده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات را ارائه نمودند.

تابع هدف در این مقاله دارای دو بخش است که عبارتند از توان و وزن، به این حالت که حداقل وزن و حداکثر توان بایستی در طراحی مدنظر قرار گیرند، ولی با نسبت‌های متفاوت که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. در این تحقیق سعی شده تا متغیرهای توان، تعداد دندانه، مدول، ضخامت چرخ‌دنده به بهینه‌ترین شکل ممکن با نرم‌افزار متلب در نظر گرفته و با نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل شوند. علاوه بر قیودی مانند قید مربوط به تنش خمشی و قید مربوط به حداقل مدول، قیودی از قبیل قید ضریب اطمینان برای تنش خمشی و تماسی، راندمان، و فاصله دو محور چرخ‌دنده نیز در نظر گرفته شده‌اند. نکته دیگر در مورد فرمول وزن استفاده شده در مقاله مذکور است که سوراخ مرکز چرخ‌دنده برای عبور شفت در نظر گرفته نشده که در این مقاله این موضوع لحاظ شده و به اندازه $\frac{1}{4}$ قطر دایره گام، سوراخ شفت برای چرخدنده تعبیه شده است.

معادلات حاکم بر چرخ‌دنده ها

در این بخش قسمت‌های موثر در بهینه‌سازی آورده شده است که شامل تابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود است که در ادامه خواهیم داشت.

تابع هدف

تابع هدف برای بهینه‌سازی چرخ‌دنده ساده بترتیب نشان داده شده می‌باشد:

$$\mathrm{COF} = 0.6\times F_1 + 0.4\times F_2 \qquad (۱)$$

که F_1 توان انتقالی بین چرخ‌دنده‌ها است که برابر با P است و F_2 وزن دو چرخ‌دنده است:

$$F_2 = (\frac{\pi}{4}\times W\times \mathrm{d_p}^2\times\rho) + (\frac{\pi}{4}\times W\times \mathrm{d_G}^2\times\rho) \qquad (۲)$$

که d_p و d_G به ترتیب قطر دایره گام پینیون و چرخ‌دنده بزرگ است. W ضخامت چرخ‌دنده‌ها و ρ چگالی چرخ‌دنده‌ها است.

قیود اعمالی

به طور کلی طراحی قطعات مکانیکی باید شامل یک سری قیود باشند. همچنین پارامترهای چرخ‌دنده باید با پارامترهای استاندارد طراحی مطابقت داشته باشند. در ادامه یک سری از قیود اعمال شده به مسئله تعریف می‌شوند.

قید تنش خمش

در هنگام انتقال توان بین شفت و دندانه‌های چرخ‌دنده، تنش خمشی ایجاد می‌شود که رابطه (۳) قید مربوط به آن را توصیف می‌کند:

$$\sigma_b - \sigma_{b_{all}} < 0 \qquad (۳)$$

که در آن $\sigma_{b_{all}}$ و σ_b به ترتیب تنش‌های مجاز و اعمال شده خمشی هستند. در آن مقدار تنش اعمال شده σ_b از هندبوک استخراج شده است[۱-۳].

قید تنش تماسی

تنش تماسی بین دندانه‌های دو چرخ‌دنده اتفاق می‌افتد به نحوی که سایش در دندانه‌های پینیون که چرخ‌دنده کوچکتر هست بیشتر اتفاق می‌افتد به این خاطر که نسبت به چرخ بزرگ بیشتر می‌چرخد. رابطه این قید در رابطه (۴) مشاهده می‌شود.

$$\sigma_c - \sigma_{c_{all}} < 0 \qquad (۴)$$

که در آن $\sigma_{c_{all}}$ و σ_c به ترتیب تنش‌های مجاز و اعمال شده تماسی هستند. σ_c که تنش اعمال شده در مسئله است از هندبوک استخراج شده است [۱-۳].

قید مدول

مقدار مدول پینیون و چرخ‌دنده بزرگ یکسان هستند و این مقدار باید از از رابطه زیر پیروی کند:

$$m \geq 1.26\sqrt[3]{\frac{M_t}{y\sigma_b\psi_m N_P}} \qquad (۵)$$

که درآن ψ_m نسبت بین ضخامت و مدول چرخ‌دنده ها، N_p تعداد دندانه‌های پینیون، y فاکتور فرم لوییس، و M_t گشتاور نرمال پیچشی انتقالی بین چرخ‌دنده ها است.

قید فاصله مرکز تا مرکز

فاصله مرکز پینیون و چرخ‌دنده بزرگ از مقدار ارائه شده در رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$C \geq (i+1)\sqrt[3]{\left(\frac{0.74}{\sigma_c}\right)^2 \times \left(\frac{EM_t}{i\psi}\right)} \qquad (۶)$$

که در آن i نسبت چرخ‌دنده، E مدول یانگ، و ψ نسبت بین ضحامت و فاصله مرکز تا مرکز چرخ‌دنده‌ها است.

قید ضریب اطمینان خمشی و تماسی

در این مسئله ضریب اطمینان تنش خمشی و تماسی مقدار ۱/۲ انتخاب شده است، در نتیجه در روابط (۷و۸) داریم:

$$SF_b = \frac{\sigma_{b_{all}}}{\sigma_b} \geq 1.2 \qquad (۷)$$

$$SF_c = \frac{\sigma_{c_{all}}}{\sigma_c} \geq 1.2 \qquad (۸)$$

قید بازده

چرخ‌دنده های مورد نظر باید بازدهی بالاتر از ۹۸٪ داشته باشند، که در رابطه (۹) داریم:

$$\eta = 100 - P_L \geq 98 \qquad (۹)$$

که در آن P_L توان تلف شده است که مقدار آن از هندبوک قابل محاسبه است[۱-۳]. مقادیر ثابت و پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین، جدول (۲) متغیرهای طراحی با در نظر گرفتن محدوده‌های مجاز را گزارش می‌دهد.

جدول(۱): ثوابت استفاده شده در مدل بهینه شده.

پارامترهای با مقادیر ثابت	*مقدار*
(نسبت چرخدنده) i	۲
(مدول یانگ) E	$1.5 \times 10^5\ N/mm^2$
(کلاس کیفیت) Q_v	۶
(سرعت زاویه پینیون) n_1	۵۰۰ rpm
(فاکتور بار متمرکز) K	۱/۴
(نسبت پواسون) ν	۰/۳
(راویه فشار) φ	۲۰°
(ضریب اصطکاک) f	۰/۰۵
(چگالی) ρ	$7 \times 10^{-6}\ kg/mm^3$
(تنش خمشی مجاز) $\sigma_{b_{all}}$	۳۵ N/mm^2
(تنش تماسی مجاز) $\sigma_{c_{all}}$	۳۵۰ N/mm^2
جنس چرخدنده ها	۴۰ Ni ۲ Cr ۱ Mo ۲۸

جدول(۲): محدوده پیشنهاد شده و مجاز برای متغیرهای طراحی مدل بهینه سازی.

متغیر طراحی	مقدار بالا	مقدار پایین	توضیح
N_P	۶۰	۱۵	تعداد دندانه پینیون
P	۱۰۰	۲۰	توان انتقال *(Kw)*
F	۱۰۰	۱۰	ضخامت چرخدنده *(mm)*
m	۲۴	۱	مدول *(mm)*

اعمال روش های بهینه سازی

الگوریتم چرخه آب

الگوریتم چرخه آب اولین بار در سال ۲۰۱۲ برای حل مسائل مهندسی، توسط اسکندر و همکارانش ابداع شد[۸]. الگوریتم چرخه آب الهام گرفته شده از چرخه آب در طبیعت از جمله روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری قلمداد می‌شود. چگونگی حرکت نهرها به سمت رودخانه‌ها و رودخانه‌ها به سمت دریا به شیوه‌ای ساده اما کاربردی در این روش بهینه‌سازی مدل شده است. استفاده از این روش درکنار روش‌های دیگر می‌تواند برای طراحان و مهندسان گزینه مناسبی جهت بهبود طراحی و همچنین معیاری جهت مقایسه عملکرد توسط الگوریتم‌های دیگر باشد.

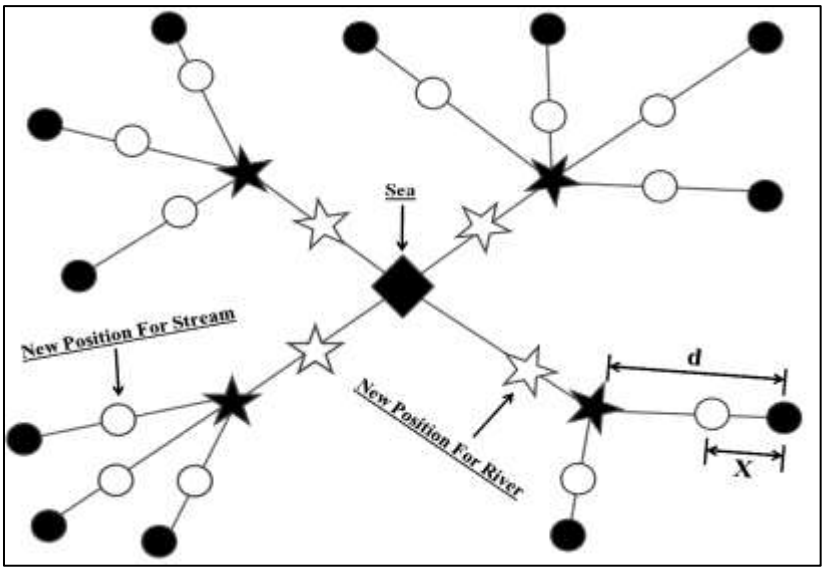
این الگوریتم با یک جمعیت اولیه‌ای از نهرها پس از بارندگی آغاز می‌شود. در ابتدا فرض می‌شود که برف و آب حاصل از بارندگی موجود، نهرها را ایجاد کرده و سپس نهرها به سمت رودخانه‌ها و رودخانه‌ها به سمت دریا (پست‌ترین نقطه زمین) سرازیر می‌شوند. حتی این امکان وجود دارد که نهرها به طور مستقیم به سمت دریا جریان داشته باشند. بسته به شدت جریان در دریا و رودخانه‌ها، نهرها به سمت رودخانه و دریا سرازیر می‌شوند. روابط(۱۰تا۱۲) مدل حرکتی نهرها و رودخانه‌ها را به سمت دریا در قالب فرمولی ساده نشان می‌دهد.

$$\vec{X}_{Stream}^{i+1} = \vec{X}_{Stream}^{i} + rand(0,1) \times 2 \times \left(\vec{X}_{Sea}^{i} - \vec{X}_{Stream}^{i}\right) \qquad (۱۰)$$

$$\vec{X}_{Stream}^{i+1} = \vec{X}_{Stream}^{i} + rand(0,1) \times 2 \times (\vec{X}_{River}^{i} - \vec{X}_{Stream}^{i}) \quad (۱۱)$$

$$\vec{X}_{River}^{i+1} = \vec{X}_{River}^{i} + rand(0,1) \times 2 \times (\vec{X}_{Sea}^{i} - \vec{X}_{River}^{i}) \quad (۱۲)$$

در حین این حرکت سطحی، اگر رودخانه‌ای منجر به جواب بهتری نسبت به دریا شد، جای دریا و رودخانه عوض می‌شود. به طور مشابه، چنین مبادلاتی می‌تواند برای نهر و رودخانه نیز اتفاق بیفتد. تبخیر یکی از فاکتورهای کلیدی در معرفی اپراتور دیگر است که می‌تواند از همگرایی نامطلوب در الگوریتم چرخه آب جلوگیری کند. فرآیند تبخیر باعث می‌شود که آب دریا با جریان آب به سمت دریا تبخیر شود، به این منظور که در یک محدوده محلی خاص بهینه نماند.
جریان های جدید در مکان‌های مختلف به چرخه بارندگی ملحق می‌شوند. شکل ۳، طرح کلی این فرایند را نشان می‌دهد[۹].



شکل (۱): فرایند حرکت سطحی الگوریتم چرخه آب برای رسیدن به بهینه.

الگوریتم شبکه عصبی

الگوریتم شبکه عصبی یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدید و الهام‌گرفته از سیستم‌های عصبی زیستی و شبکه‌های عصبی مصنوعی است که برای حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده پیشنهاد شده است[۱۰]. روش پیشنهادی با نام الگوریتم شبکه عصبی (NNA) بر اساس ساختار منحصر به فرد شبکه‌های عصبی مصنوعی توسعه پیشنهاد داده شده است. الگوریتم شبکه عصبی از ساختار پیچیده شبکه‌های عصبی مصنوعی و عملگرهایش برای تولید راه حل‌های جدید بهره می‌گیرد. در مورد اثبات هم‌گرایی الگوریتم شبکه عصبی، رابطه بین بهره‌برداری بداهه یا تصادفی هر پارامتر، تحت یک فاصله زمانی نامتقارن بدست خواهد آمد و هم‌گرایی تکرار شونده الگوریتم شبکه عصبی به صورت تئوری اثبات شده است. علاوه بر این، چندین مساله طراحی مهندسی محدود مورد بررسی قرار گرفته است تا کارایی الگوریتم شبکه عصبی برای جستجو در منطقه ممکنه در مسائل بهینه‌سازی دارای قید وشرط یا محدودیت را مورد اعتبارسنجی قرار دهد. عدم لزوم تلاش برای تنظیم پارامترهای اولیه مناسب از لحاظ آماری می‌تواند الگوریتم شبکه عصبی را نسبت به سایر الگوریتم های بهینه‌ساز مطالعه شده دیگر تمایز و برتری بسیاری ببخشد.

می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های عصبی مصنوعی و ساختار خاص آنها می‌تواند با موفقیت به عنوان یک روش بهینه‌سازی فرا ابتکاری به منظور اعمال در مسائل بهینه‌سازی به کارگرفته شوند.

مشابه سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، الگوریتم شبکه عصبی نیز با یک جمعیت اولیه بنام جمعیت راه‌حل‌های الگو آغاز می‌شود. از آنجا که شبکه‌های عصبی مصنوعی اکثرا برای پیش‌بینی اهداف استفاده می‌شوند، داده‌های ورودی و هدف را دریافت و رابطه‌ای بین آنها پیش‌بینی می‌کند (نگاشت داده های ورودی به داده‌های هدف). معمولا ورودی‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی ورودی‌هایی هستند که به وسیله آزمایشات، محاسبات، و موارد دیگر بدست می‌آیند. شبکه‌های عصبی مصنوعی به زبان ساده سعی دارند که داده‌های ورودی را به داده‌های هدف نگاشت کنند. از این رو شبکه‌های عصبی مصنوعی سعی در کاهش خطا (جذر خطای میانگین) در میان راه حل‌های پیش‌بینی‌شده و راه حل‌های هدف با استفاده از تغییر مکرر مقادیر توابع وزن (W_{ij}) دارند. با این حال در بهینه‌سازی، هدف پیدا کردن راه حل بهینه است و یک الگوریتم فرا ابتکاری باید با استفاده از یک استراتژی تعریف شده راه حل بهینه ممکن را جستجو کند. بنابراین با الهام از شبکه‌های عصبی مصنوعی، در الگوریتم شبکه عصبی(NNA) بهترین راه‌حل بدست آمده در هر تکرار (یعنی راه حل بهینه موقتی) بعنوان داده‌های هدف فرض می‌شود وهدف از این کار کاهش خطا بین داده‌های هدف و سایر راه‌حل‌های الگوی پیش‌بینی‌شده است (حرکت سایر راه حل‌های الگوی پیش‌بینی‌شده به سمت راه حل هدف). شبکه‌های عصبی مصنوعی در واقع تلاشی برای حرکت از سمت مدل محاسباتی فون نیومن به سمت مدلی است که با توجه به عملکرد و ویژگی‌های مغز انسان طراحی شده است. مدل فون نیومن گرچه هم اکنون بسیار استفاده می‌شود، اما از کمبودهایی رنج می‌برد که تلاش شده است این کمبودها در شبکه‌های عصبی مصنوعی برطرف شود.

در سال ۱۹۴۳ مدلی راجع به عملکرد نورون‌ها نوشته شد که با اندکی تغییر، امروزه بلوک اصلی سازنده اکثر شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. عملکرد اساسی این مدل مبتنی بر جمع کردن ورودی‌ها و به دنبال آن به وجود آمدن یک خروجی است. ورودی‌های نورون‌ها از طریق دنریت‌ها که به خروجی نورون‌های دیگر از طریق سیناپس متصل است، وارد می‌شوند. بدنه سلولی کلیه این ورودی‌ها را دریافت می‌کند و چنانچه جمع این مقادیر از مقداری که به آن آستانه گفته می‌شود بیشتر باشد، در اصطلاح برانگیخته شده یا آتش می‌کند و در این صورت، خروجی نورون روشن یا خاموش خواهد شد.

الگوریتم شبکه عصبی از ساختار منحصر بفرد شبکه بیولیژیکی عصبی الهام گرفته شده است. این الگوریتم با مقدار اولیه شروع می‌شود که به آن جمعیت الگو گفته می‌شود. هر تکرار در این الگوریتم به عنوان بهترین حل در نظر گرفته می‌شود که هدف به حداقل رساندن مقدار خطا حاصله است. مقدار مورد نظر وزنی مربوط به حل مورد نظر باید از بین مقدار وزنی جمعیت (ماتریس وزنی) بعد از تعیین مقدار وزنی موردنظر انتخاب شود. مقدار وزنی اصلی شبکه عصبی اعداد تصادفی هستند که با تخمین مقدار خطای شبکه در هر تکرار تنظیم می‌شود. همچنین مقادیر وزنی اولیه به صورت تصادفی از اعداد صفر تا یک هستند.

البته محدودیت‌هایی برای ماتریس وزنی وجود دارد. این محدودیت‌های تحمیل شده از مقدار یک تجاوز نمی‌کنند. از روش مجموع مقادیر وزنی استفاده شده در شبکه عصبی برای مقداردهی به محدوده‌های جدید، بعد از تولید ماتریس وزنی و در نهایت بروزرسانی محدوده‌های جدید به کارگرفته شده است [۱۱،۱۲] ،که در معادلات(۱۴و۱۳) خواهیم داشت:

$$\vec{X}_j^{\,New}(t+1) = \sum_{i=1}^{Npop} w_{ij}(t) \times \vec{X}_i(t). \quad j = 1,2,3,\ldots,N_{pop} \tag{۱۳}$$

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \vec{X}_i^{New}(t+1), i = 1,2,3,\ldots,N_{pop} \tag{۱۴}$$

نتایج عددی بدست آمده

در این بخش نتایج محاسباتی و آماری حاصل از بهینه‌سازی توسط دو الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. برای برنامه نویسی، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. جدول (۳) شامل متغیرهای طراحی بهینه‌شده و قیود به کار گرفته شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود نتایج دو الگوریتم استفاده شده نتایج نزدیکی را نشان می‌دهند. همچنین در جدول (۴) اطلاعات سیتماتیکی دو چرخدنده درگیر آورده شده است.

جدول(۳): پارامترهای بهینه شده در نرم‌افزار متلب.

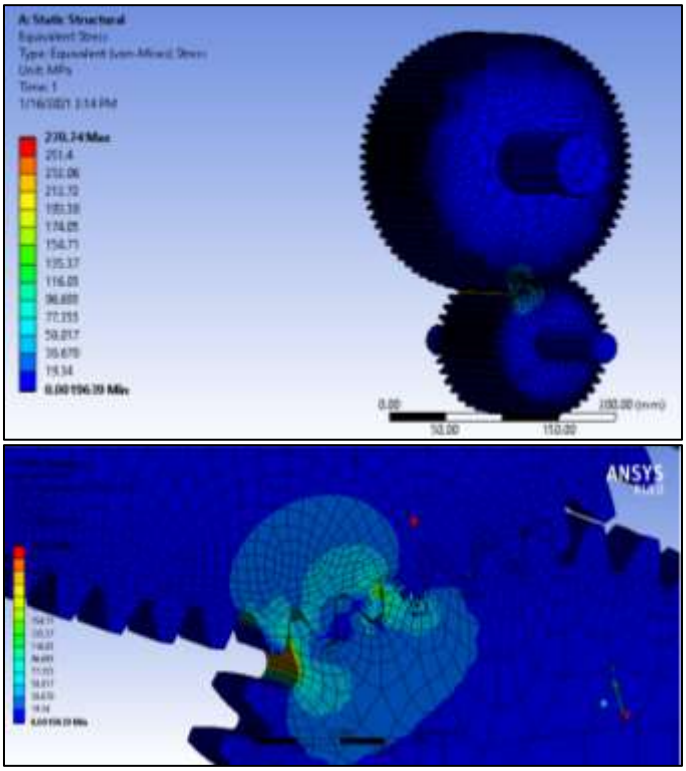
بهینه	پارامترها	WCA	NNA
متغیرهای طراحی	N_p (تعداد دندانه ها)	۳۸	۳۸
	توان (Kw)	۶۷/۲۳۸	۶۶/۸۶۷
	ضخامت دندانه (mm)	۱۰۰	۱۰۰
	مدول (mm)	۲/۷۷۴	۲/۷۵۵
قیود اعمال شده	SF (ضریب اطمینان تنش خمشی)	۱/۲	۱/۲
	SH (ضریب اطمینان تنش تماسی)	۱/۳۰۲	۱/۳۰۲
	وزن (Kg)	۱۷/۱۹۲	۱۶/۹۴۸
	η (بازده)	۹۸/۰۲۵	۹۸/۰۲۵
	C (فاصله مرکز تا مرکز)	۱۵۸/۱۲	۱۵۷/۰۳
	σ_b (تنش خمشی اعمالی)	۲۹/۱۷	۲۹/۱۶
	σ_c(تنش تماسی اعمالی)	۲۶۸/۶۸	۲۶۸/۶۵
تابع هدف	Best COF	-۱۶/۵۸۰	-۱۶/۵۷۷
	Worst COF	-۱۶/۵۷۲	-۱۵/۴۲۶
	Average COF	-۱۶/۵۷۹	۱۶-/۳۹۶
	Standard Deviation COF	۰/۰۰۱	۰/۲۶۴

با توجه به نتایج جدول (۳) برای متغیرهای بهینه‌سازی می‌توان دریافت که هر دو الگوریتم تقریباً نتایج مشابهی دارند. از بین این دو الگوریتم داده‌های الگوریتم چرخه آب انتخاب می‌شود، زیرا که با اختلاف بسیار ناچیز جواب بهینه‌تری را ارایه می‌دهد. هرچند، اختلاف بین دو روش در حدود چند هزارم است که تفاوت زیادی ایجاد نمی‌کند.

جدول(۴): پارامترهای هندسی بهینه شده.

پارامترها	چرخدنده پینیون	چرخدنده بزرگ
قطر دایره ادندوم (mm)	۱۱۰/۹۶	۲۱۶/۳۷۲
قطر دایره دیدندوم (mm)	۹۸/۴۷۸	۲۰۳/۸۹
قطر دایره لقی (mm)	۹۹/۸۶۴	۲۰۵/۲۷۶
قطر دایره گام (mm)	۱۰۵/۴۱۲	۲۱۰/۸۲۴
ادندوم (mm)	۲/۷۷۴	۲/۷۷۴
دیدندوم (mm)	۳/۴۶۷	۳/۴۶۷
لقی (mm)	۰/۶۹۳	۰/۶۹۳

در این تحقیق با در نظر گرفتن بهینه‌سازی در محیط متلب از روش‌های المان محدود (نرم افزار انسیس) نیز استفاده شده است تا صحتی بر نتایج حاصله باشد. شکل (۴) نشان دهنده نحوه توزیع تنش بین دو چرخ‌دنده است که مشاهده می‌شود که حداکثر تنش بدست آمده نزدیک به مقدار محاسبه شده در محیط متلب است (جدول ۵).



شکل(۲): بدست آوردن تنش فون مایزز بین چرخ‌دنده ها با استفاده از نرم افزار انسیس.

در جدول (۵) مقایسه‌ای بین دو روش المان محدود و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مشاهده می‌شود.

جدول (۵): مقایسه نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی و مدل‌سازی.

روش	تنش اعمالی (MPa)
متلب	۲۶۸/۶۸
انسیس	۲۷۰/۷۴

نتیجه گیری

در این مقاله بهینه‌سازی با روش فرا ابتکاری به همراه روش مدل‌سازی توانستند پارامترهای بهینه یک جفت چرخدنده درگیر همراه با در نظر گرفتن قیود آن‌ها و در شرایط بدون روغن‌کاری را ارائه دهند. به کمک نرم افزار انسیس که یکی از بهترین نرم افزارها در زمینه تحلیل و مدل‌سازی است و همچنین روش‌های بهینه‌سازی چرخه آب و شبکه عصبی (الگوریتم‌های فرا ابتکاری)، بیشترین توان در کمترین وزن طراحی و تحلیل شد. متغیرهای طراحی شامل تعداد دندانه، ضخامت دندانه، توان، و مدول بودند.

پارامترهای بهینه شده و نتایج حاصله از الگوریتم‌های فراابتکاری با روش اجزای محدود در محیط انسیس مقایسه شده و این مقایسه بین دو رویکرد از یک مسئله به خوبی یکدیگر را تایید نمودند. نتایج حاصله نشان می‌دهد، استفاده از مدل ریاضی پیشنهاد شده، مدلی مطلوب و منطبق بر روش‌های اجزا محدود است و یافتن جواب بهینه توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری، راه حل جایگزین برای یک طراحی مهندسی بهینه محسوب می‌شود.

مراجع

[1] Budynas. R.G., Nisbett, J.K. (2009). Shigley's Mechanical Engineering Design. 11th Edition.
[2] Townsend, D. P. (1992). Dudley's Gear Handbook. McGraw-Hill, 2nd Edition.
[3] Norton, Robert L. (2004). Design of Machinery (3rd ed.), McGraw-Hill Professional.
[4] Yang X.S. (2010). Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications", Wiley & Sons, New Jersey.
[5] Zolfaghari, A., Goharimanesh, M., Akbari, A.A. (2017). Optimum Design of Straight Bevel Gears Pair Using Evolutionary Algorithms. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 39.pp 2121–2129.
[6] Savsani, V., Rao, R.V., VakhariaM, D.P. (2010). Optimal Weight Design of a Gear Train Using Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing Algorithms. Mechanism and Machine Theory 45.pp 531–541.
[7] Hoseiniasl, M., Jafari Fesharaki, J. (2020). 3D Optimization of Gear Train Layout Using Particle Swarm Optimization Algorithm. Journal of Applied and Computational Mechanics 6(4). pp 823-840.
[8] Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., & Hamdi, M. (2012). Water Cycle Algorithm–A Novel Metaheuristic Optimization Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems. Computers & Structures 110. pp 151-166.
[9] Sadollah, A., Eskandar, H., Bahreininejad, A., & Kim, J. H. (2015). Water Cycle Algorithm with Evaporation Rate for Solving Constrained and Unconstrained Optimization Problems. Applied Soft Computing. 30. pp 58-71.
[10] Sadollah, A., Sayyaadi, H., & Yadav, A. (2018). A Dynamic Metaheuristic Optimization Model Inspired By Biological Nervous Systems: Neural Network Algorithm. Applied Soft Computing 71. pp 747-782.
[11] Zhang, Y., Jin, Z., & Chen, Y. (2020). Hybridizing Grey Wolf Optimization with Neural Network Algorithm for Global Numerical Optimization Problems. Neural Computing and Applications 32(14). pp 10451-10470.
[12] Zhang, Y., Jin, Z., & Chen, Y. (2020). Hybrid Teaching–Learning-Based Optimization and Neural Network Algorithm for Engineering Design Optimization Problems. Knowledge-Based Systems 187.pp 104836.