

سنتر بهینه مکانیزم نرم صفحه‌ای با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،
mokhtari.mehdi73@yahoo.com
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،
varedi@shahroodut.ac.ir

مهدی مختاری کرچگانی
سید مجتبی واردی کولائی*

چکیده

مکانیزم‌های نرم از طبیعت انعطاف‌پذیر خود برای حرکت استفاده کرده و از نظر عملکردی نسبت به مکانیزم‌های سنتی دارای مزیت‌هایی از جمله دقت بالاتر، طراحی یکپارچه و هزینه ساخت کمتر می‌باشند. این مکانیزم‌ها دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از قبیل حسگرها، گریپرها، سیستم‌های میکروالکترومکانیک، ربات‌های جراحی و ابزارهای با دقت بالا می‌باشند. بهینه‌سازی توپولوژی و یا استخراج ساختار بهینه مکانیزم‌های نرم صفحه‌ای با استفاده از روش رقابت استعماری، موضوع اصلی این پژوهش است. همچنین از روش الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی و مقایسه نتایج استفاده شده است. برای تحلیل این مکانیزم‌ها که از المان‌های تیر تشکیل شده‌اند، از روش المان محدود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند روش‌های بهینه‌سازی به خوبی توانسته‌اند مساله سنتر بهینه مکانیزم را حل و نتایج را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به مقالات مشابه بهبود بخشد. همچنین مقایسه دو الگوریتم مورد استفاده نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری توانسته پایه‌های الگوریتم ژنتیک و در برخی معیارهای مقایسه‌ای، بهتر از آن عمل کند.
واژه‌های کلیدی: مکانیزم نرم، سنتر بهینه، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک، المان محدود.

Optimal Synthesis of the Planar Parallel Compliant Mechanism Using ICA Algorithm

M. Mokhtari Karchegani
S. M. Varedi-Koulai

Department Of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology
Department Of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology

Abstract

Due to the flexibility of the compliant mechanisms (CMs), they are utilized to perform mechanical. From the viewpoint of performance, CMs have some advantages over traditional ones, such as higher precision, integrated design, and lower manufacturing costs. These flexible mechanisms have wide applications such as sensor, gripper, parallel mechanisms, MEMS, high-precision devices and biomedical and surgery robots. Topology optimization or extracting the optimal design of the planar parallel compliant mechanisms using the imperialist competition algorithm is the main novelty of the current study. Furthermore, the genetic algorithm method was used for validation. The optimized CMs that consist of beam elements are analyzed with the finite element method. The goal of this design is to maximize the mechanical advantage and the geometrical advantage. The results show that use of the imperialist competition algorithm for this problem has led to a significant improvement (20 to 30 percent) over the results from similar articles. In addition, the comparison of the two algorithms used shows that ICA performs better than the GA.

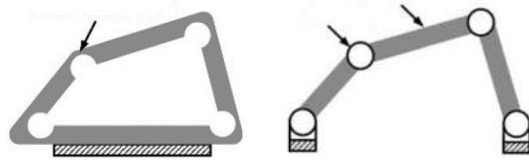
Keywords: Compliant mechanism, Optimal synthesis, Imperialist competition algorithm, Genetic algorithm, Finite element.

نمی‌شود، مشکلات ناشی از لقی مفاصل از بین می‌رود و این مکانیزم‌ها می‌توانند در کاربردهایی با دقت بالا مورد استفاده قرار گیرند [۱].

۱- مقدمه

مکانیزم‌های معمولی از اعضای صلب (با سفتی بالا) و مفاصل سنتی (با نرمی بالا) تشکیل شده‌اند (شکل ۱-الف). با توجه به این که مکانیزم‌های معمولی حرکت خود را از طریق جابجایی‌های نسبی اعضا (که از طریق مفاصل ایجاد می‌شوند) به دست می‌آورند، وجود لقی در مفاصل این مکانیزم‌ها، منشا وجود مشکلاتی می‌باشد.

با توجه به مشکلات این مکانیزم‌ها، محققین در دو دهه‌ی اخیر به مکانیزم‌هایی تحت عنوان مکانیزم‌های نرم^۱ دست یافته‌اند که دارای اعضای انعطاف‌پذیر و مفاصل خمشی^۲ می‌باشند (شکل ۱-ب). این مکانیزم‌ها می‌توانند به صورت یک‌پارچه ساخته شوند و نیاز به مونتاژ کردن ندارند. با توجه به این که مکانیزم‌های نرم به صورت یکپارچه می‌باشند و هیچگونه مفصلی (از نوع سنتی) در این مکانیزم‌ها استفاده



الف- مکانیزم چهارمیله‌ای متداول
ب- مکانیزم چهارمیله‌ای نرم
شکل ۱- مکانیزم‌های سنتی و نرم

با توجه به موارد ذکر شده، کاربرد این مکانیزم روزبه‌روز در حال افزایش بوده و از جمله کاربردهای مهم آن می‌توان به استفاده در حسگرها و ابزار دقیق [۲-۳]، سیستم‌های میکروالکترومکانیک [۴-۵]، گریپرها [۶] و کاربردهای پزشکی [۷-۸] اشاره کرد.
برای مکانیزم‌های نرم که اساس این مقاله را تشکیل می‌دهند،

¹ Compliant Mechanism
² Flexure

$$k^e = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & EI/L \end{bmatrix} \quad (1)$$

که E، A، I و L به ترتیب مدول الاستیسیته، مساحت سطح مقطع، ممان اینرسی و طول می‌باشد. ماتریس کلی مکانیزم نیز با جمع همه ماتریس‌های سفتی المان‌های مختلف (در دستگاه مختصات ثابت) بصورت زیر خواهد بود [۱۴]:

$$K = \sum P^T R^T k^e P R \quad (2)$$

که ماتریس‌های R و P به ترتیب ماتریس‌های دوران و انتقال بین دستگاه‌های محلی و دستگاه مختصات ثابت می‌باشند و برابرند با [۱۴]:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در نتیجه، معادله تعادل استاتیکی برای کل سیستم برابر است با [۱۴]:

$$KU = F \\ U = K^{-1}F \quad (5)$$

که در آن F ماتریس نیرو در مختصات اصلی و U ماتریس جابه‌جایی در مختصات اصلی برای کل دامنه طراحی است.

۳- بهینه‌سازی

۳-۱- تابع هدف مساله بهینه‌سازی

در سنتز بهینه‌ی این مکانیزم‌ها از توابع هدف مختلفی استفاده می‌شود که از مهمترین آن‌ها می‌توان به مزیت مکانیکی^۱ (MA) و مزیت هندسی^۲ (GeA) اشاره کرد. مزیت مکانیکی بصورت نسبت نیروی خروجی به نیروی ورودی تعریف می‌شود. بنابراین بیشینه کردن مزیت مکانیکی، نیروی خروجی را به حداکثر مقدار خود خواهد رساند.

$$MA = \frac{F_{out}}{F_{in}} \quad (6)$$

که F_{in} و F_{out} به ترتیب نیروی ورودی و نیروی خروجی می‌باشند. مزیت هندسی نیز بصورت نسبت جابجایی خروجی به جابجایی ورودی تعریف می‌شود:

$$GeA = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (7)$$

که U_{in} و U_{out} به ترتیب جابجایی خروجی و جابجایی ورودی می‌باشند. متغیرهای طراحی این مساله بهینه‌سازی المان‌های تیر موجود در مکانیزم هستند. در واقع وجود و یا عدم وجود هر کدام از این المان‌ها از طریق فرایند بهینه‌سازی مشخص می‌شود. بنابراین تعداد متغیرهای طراحی مساله، برابر با تعداد المان‌ها موجود در شبکه اولیه مکانیزم است. همچنین متغیرهای طراحی از نوع دودویی (صفر و یک)

روش طراحی براساس رویکرد بهینه‌سازی ساختار می‌باشد. این روش از سه مرحله تشکیل می‌شود: ۱- بهینه‌سازی توپولوژی، ۲- بهینه‌سازی شکل و ۳- بهینه‌سازی اندازه [۹]. در این پژوهش، مکانیزم بصورت المان‌های (تیر) دوبعدی متصل به هم، با ابعاد مشخص، مدل‌سازی می‌شود که مدول الاستیک (E) این المان‌ها به عنوان یک متغیر باینری تعریف می‌شود. عدد صفر برای این متغیر به معنای عدم وجود آن المان و عدد یک به معنای وجود آن المان در سازه مکانیزم است.

بر این اساس، در سال‌های گذشته کارهای مختلفی در این زمینه انجام شده است. در ابتدا می‌توان به کارهای هاول اشاره نمود [۱۰]. او در کتاب خود به بررسی توابع هدف مختلف در طراحی مکانیزم‌های نرم پرداخته است. ساکسنا به بررسی چندین تابع هدف مختلف پرداخت و آن‌ها را برای رسیدن به بهترین مکانیزم با یکدیگر مقایسه نمود [۱۱]. [۱۲]. کاو و آنتانزوروش یک روش جدید براساس مش‌بندی ترکیبی در حل المان محدود لولاهای خمشی ارائه کردند [۱۳]. کریشنان و همکارانش نیز به طراحی مکانیزم نرمی پرداختند که نسبت به جابجایی حساسیت بالایی داشته باشد [۲]. لینگ و همکارانش یک روش نیمه تحلیلی براساس المان محدود برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی مکانیزم‌های نرم ارائه کردند [۱۴]. همچنین دیاب و اسمعیلی در کار خود، به بررسی چهار نوع توابع هدف مختلف در طراحی بهینه تقویت‌کننده جابجایی پرداخته‌اند [۱۵].

در این مقاله به سنتز بهینه مکانیزم نرم صفحه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری پرداخته خواهد شد. نکته اساسی در این میان، اثبات کارایی روش بهینه‌سازی رقابت استعماری در این چنین مسایلی است، که در واقع در دسته‌بندی مسایل بهینه‌سازی دودویی (باینری) قرار می‌گیرند. روش الگوریتم ژنتیک سردسته روش‌های بهینه‌سازی دودویی است که اساساً بر مبنای این ادبیات پایه‌گذاری شده است، اما در این مقاله با اجرای این دو الگوریتم و مقایسه نتایج، به بررسی توانایی الگوریتم رقابت استعماری در این نوع مسایل پرداخته می‌شود.

۲- ساختار مکانیزم نرم

در این مقاله، یک دامنه طراحی دو بعدی با گره‌های ورودی، خروجی و تکیه‌گاه‌های از پیش تعیین شده، در نظر گرفته می‌شود. سپس الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، با توجه به تابع هدف تعیین شده و با کاهش المان‌های مختلف، به دنبال ساختار بهینه مکانیزم می‌گردد. بنابراین متغیرهای طراحی در این مساله وجود یا عدم وجود المان‌های مختلف می‌باشد. خصوصیات هندسی و جنس همه المان‌های تیر با هم یکسان است.

برای تحلیل ساختار مکانیزم نرم می‌توان از روش المان محدود استفاده نمود. بدین منظور، برای آنالیز المان محدود از المان‌های قاب استفاده می‌شود که می‌توانند نیروهای محوری و همچنین نیروهای برشی و خمشی را تحمل کنند. ماتریس سفتی هر کدام از المان‌های قاب در مختصات محلی بصورت رابطه زیر قابل استخراج است [۱۴]:

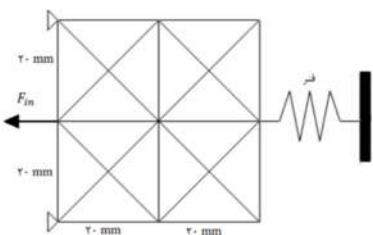
¹ Mechanical Advantage (MA)

² Geometrical Advantage (GeA)

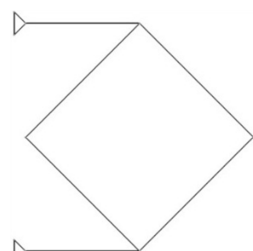
جدول ۱- مشخصات هندسی و توابع هدف مثال‌های عددی [۱۳]

پارامتر	مثال اول	مثال دوم
مدول الاستیسیته (GPa)	۲	۱۰۵
ضخامت خارج صفحه (mm)	۱	۲
ضخامت داخل صفحه (mm)	۰/۶۵	۰/۵
نیروی ورودی (N)	۱	۱
سفتی فنر (N/m)	۱۰۰۰	۱۰۰۰
تعداد المان‌ها	۲۸	۴۸
تابع هدف مساله	Max (MA)	Max (GeA)

همچنین نتایج عددی به‌دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۲ نشان داده شده است. نمودار تابع هدف بر اساس تعداد تکرار نیز در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، مکانیزم به‌دست آمده در این قسمت حدود ۲۰ درصد از مرجع [۱۳] عملکرد بهتری داشته است.



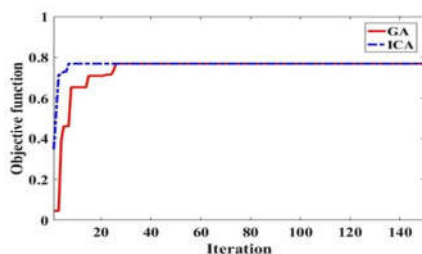
شکل ۲- دامنه‌ی طراحی مثال اول



شکل ۳- مکانیزم بهینه مثال اول

جدول ۲- بهترین نتایج به‌دست آمده از دو الگوریتم در مثال اول

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی (مرجع [۱۳])	مزیت مکانیکی	بهبود
رقابت استعماری	۷	۰/۷۶۹	۰/۶۴	٪۲۰/۱۵
ژنتیک	۲۶	۰/۷۶۹	۰/۶۴	٪۲۰/۱۵



شکل ۴- تغییرات تابع هدف بر حسب تکرار در مثال اول

هستند، بگونه‌ای که عدد یک بیانگر وجود المان و عدد صفر به‌معنای عدم‌وجود المان است. قید مورد‌استفاده برای این مساله، قید پیوستگی (عدم گسیختگی) بخش‌های مختلف مکانیزم و در واقع وجود ارتباط بین ورودی و خروجی مکانیزم است. همچنین تعداد جمعیت و تعداد تکرار در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مشابه مرجع [۱۳]، و به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۵۰ در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۲- روش بهینه‌سازی رقابت استعماری

معمولا پژوهشگران برای ابداع الگوریتم‌های بهینه‌سازی از طبیعت و یا رفتار طبیعی برخی از موجودات الهام می‌گرفته‌اند، درحالی‌که در الگوریتم ICA از پدیده‌ای اجتماعی در جامعه بشری که حاصل رفتار و عملکرد کشورهای استعمارگر و کشورهای مستعمره است، الگوبرداری شده است. این الگوریتم توسط آتش‌پز و همکارانش در سال ۲۰۰۷ براساس رقابت امپریالیستی پیشنهاد شده است [۱۶]. این الگوریتم مانند دیگر روش‌ها با یک جمعیت اولیه تصادفی آغاز به کار می‌کند و هر عضو از جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته‌ی مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر بسته به قدرت خود تعدادی از کشورهای مستعمره را تحت کنترل خود قرار می‌دهد. در ادامه کشورهای استعمارگر برای داشتن مستعمره‌های بیشتر عملیاتی را تحت عنوان سیاست جذب و رقابت استعماری انجام می‌دهند. مراحل شش‌گانه این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد [۱۶]:

- شکل‌دهی امپراطوری اولیه
- سیاست جذب
- انقلاب
- جابجایی مستعمره و استعمارگر
- رقابت استعماری
- سقوط امپراطوری‌های ضعیف

این الگوریتم تا برآورده شدن شرط همگرایی یا اتمام تعداد تکرار ادامه پیدا خواهد کرد. در نهایت، همه‌ی امپراطوری‌ها سقوط خواهد کرد و تنها یک امپراطوری باقی خواهد ماند.

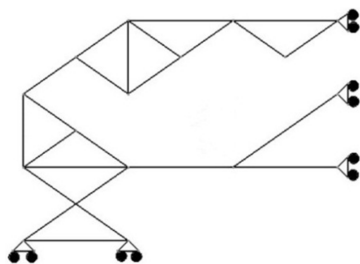
۴- مثال‌های طراحی و نتایج

در این قسمت به ذکر دو مثال عددی پرداخته می‌شود و نتایج با نرم افزار المان محدود Ansys مقایسه خواهند شد. در مثال اول، تابع هدف مساله بصورت بیشینه‌کردن مزیت مکانیکی تعریف شده است، درحالی‌که برای مثال دوم، تابع هدف مساله بیشینه‌کردن مزیت هندسی می‌باشد. مشخصات هندسی و اطلاعات کلی مربوط به مثال‌ها در جدول ۱ ارائه داده شده است.

۴-۱- مثال عددی اول: مکانیزم معکوس‌کننده نیرو

دامنه‌ی طراحی این مثال در شکل ۲ نشان داده شده است که نشان می‌دهد تعداد متغیرهای طراحی (تعداد المان‌های مکانیزم) برابر ۲۸ می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که ۱۸ المان در طی فرایند بهینه‌سازی حذف، و فقط ۱۰ المان در ساختار مکانیزم باقی مانده‌اند.

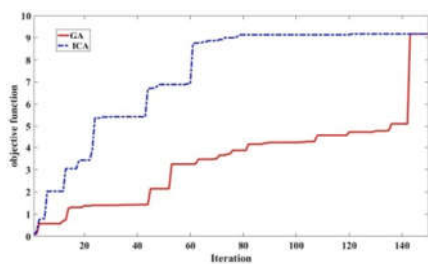
مکانیزم به دست آمده در این پژوهش حدود ۳۰ درصد نسبت به مرجع [۱۳] مزیت هندسی بالاتری داشته است. نمودار تغییرات مقادیر تابع هدف بر اساس تعداد تکرار برای دو الگوریتم نیز در شکل ۷ ارائه شده است. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۱۲۱ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۱۴۳ به جواب مورد نظر دست یافته‌اند. نتایج مدل‌سازی مکانیزم بهینه بدست آمده در نرم‌افزار Ansys و مقایسه آن‌ها با حل تحلیلی نیز در جدول ۵ آمده است.



شکل ۶- مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی مثال دوم

جدول ۴- بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم در مثال دوم

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت هندسی	مزیت هندسی (مرجع [۱۳])	درصد بهبود
رقابت استعماری	۱۲۱	۹/۱	۷	٪۳۰
ژنتیک	۱۴۳	۹/۱	۷	٪۳۰



شکل ۷- تغییرات تابع هدف بر حسب تکرار در مثال دوم

جدول ۵- میزان جابجایی در حل با Ansys برای مکانیزم مثال دوم

روش	U_{in} (mm)	U_{out} (mm)	$ U_{out}/U_{in} $
حل تحلیلی	-۰/۰۲۸۵	۰/۰۲۶۲	۹/۱۹
Ansys حل	-۰/۰۲۹۹	۰/۰۲۶۰۴	۸/۷۱
درصد خطا	۴/۹	۰/۶۱	۵/۲

۵- مقایسه روش‌های بهینه‌سازی

نتایج مثال‌ها نشان دادند که دو روش بهینه‌سازی در نهایت به یک پاسخ رسیده‌اند، البته تعداد حداقل تکرارها متفاوت بوده است که در این قسمت به مقایسه آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین باید به این نکته اشاره نمود که بهترین پاسخ برای هر روش از بین ۲۰ اجرای مختلف بدست آمده است. شکل ۸ مقایسه‌ای کلی از مقادیر تابع هدف را نشان می‌دهد. در این شکل میزان بهبود مکانیزم‌های نرم در مثال‌های مختلف نسبت به مرجع مورد نظر به وضوح مشخص است.

نتایج نشان می‌دهند الگوریتم ICA در هر دو مثال خیلی زودتر از

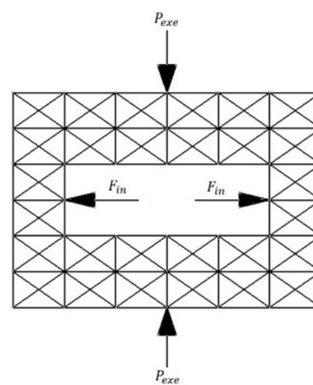
همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است هر دو الگوریتم به یک جواب یکسان رسیده‌اند در حالی که الگوریتم رقابت استعماری در تعداد تکرار کمتری به جواب بهینه دست پیدا کرده است. همچنین، نتایج تحلیل المان محدود مکانیزم بدست آمده در نرم‌افزار Ansys و مقایسه آن با حل تحلیلی در جدول ۳ آمده است. بیشینه خطای مقادیر بدست آمده از حل Ansys نسبت به حل تحلیلی تقریباً ۰/۲۵ درصد می‌باشد که خطای بسیار ناچیز و قابل قبولی است.

جدول ۳- میزان جابجایی در حل با Ansys برای مکانیزم مثال اول

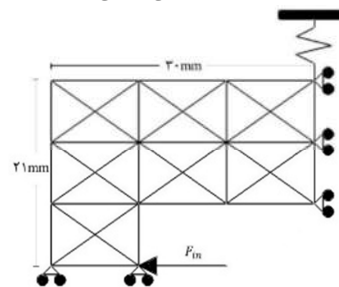
روش	U_{in} (mm)	U_{out} (mm)	$ U_{out}/U_{in} $
حل تحلیلی	-۰/۸۳۵	۰/۷۶۹	۰/۹۲۰۹۶
Ansys حل	-۰/۸۳۷	۰/۷۷۱	۰/۹۲۱۱۵
درصد خطا (%)	۰/۲۳۹	۰/۲۶	۰/۰۲

۴-۲- مثال عددی دوم: مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی

اطلاعات هندسی این مساله در جدول ۱ و دامنه‌ی طراحی آن در شکل ۵-الف نشان داده شده است. به دلیل وجود تقارن و به منظور کاهش محاسبات، می‌توان یک-چهارم این دامنه کلی را مطابق شکل ۵-ب در نظر گرفت و طراحی را برای این دامنه کوچک‌تر انجام داد.



الف) دامنه‌ی کلی طراحی



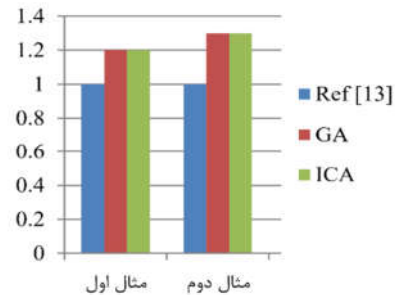
ب) یک چهارم دامنه طراحی

شکل ۵- دامنه‌ی اولیه برای طراحی مکانیزم مثال دوم

همانند مثال قبل، مکانیزم بهینه بدست آمده بوسیله هر دو روش یکسان بوده و از ۴۸ المان فقط ۲۵ المان باقی مانده و بقیه در طی فرایند بهینه‌سازی حذف شده‌اند (شکل ۶). همچنین نتایج عددی به-دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴ نشان می‌دهد که

- [2] Krishnan G. and Ananthasuresh G.K. Evaluation and design of displacement-amplifying compliant mechanisms for sensor applications. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, No.10, 2008.
- [3] Gao Z. and Zhang D., Design, analysis and fabrication of a multidimensional acceleration sensor based on fully decoupled compliant parallel mechanism. *Sensors and actuators A: physical*, Vol. 163, no. 1, pp. 418-427, 2010.
- [4] Luhuruka R. and Hesketh P.J., Design of fully compliant, in-plane rotary, bistable micromechanisms for MEMS applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.134, no. 1, pp. 231-238, 2007.
- [5] Kota S., Joo J., Li Z., Rodgers S.M. and Sniegowski J. Design of compliant mechanisms: applications to MEMS. *Analog integrated circuits and signal processing*, Vol. 29, no. 1-2, pp. 7-15, 2001.
- [6] Zhang D., Zhang Z., Gao Q., Xu D. and Liu S., Development of a monolithic compliant SPCA-driven micro-gripper. *Mechatronics*, Vol. 25, pp. 37-43, 2015.
- [7] Martin T., Gengenbach U., Guth H., Ruther P., Paul O. and Bretthauer G., Silicon linkage with novel compliant mechanism for piezoelectric actuation of an intraocular implant. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 188, pp. 335-341, 2012.
- [8] Kota S., Lu K.J., Kreiner Z., Trease B., Arenas J. and Geiger J., Design and application of compliant mechanisms for surgical tools. pp. 981-989, 2005.
- [9] Hetrick J.A. and S. Kota., An energy formulation for parametric size and shape optimization of compliant mechanisms. pp. 229-234, 1999.
- [10] Howell, L.L., Compliant mechanisms. In *21st century kinematics*, pp. 189-216. Springer, London, 2013.
- [11] Saxena A. and Ananthasuresh G.K., On an optimal property of compliant topologies. *Structural and multidisciplinary optimization*, Vol. 19, no. 1, pp. 36-49, 2000.
- [12] Saxena, A., Topology design of large displacement compliant mechanisms with multiple materials and multiple output ports. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 30, no. 6, pp. 477-490, 2005.
- [13] Cao L., Dolovich A.T. and Zhang W.C., Hybrid compliant mechanism design using a mixed mesh of flexure hinge elements and beam elements through topology optimization. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137, no. 9, 2015.
- [14] Ling M., Cao J., Jiang Z. and Lin J., A semi-analytical modeling method for the static and dynamic analysis of complex compliant mechanism. *Precision Engineering*, Vol. 52, pp. 64-72, 2018.
- [15] Diab N. and Smaili A., An ants-search based method for optimum synthesis of compliant mechanisms under various design criteria. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 114, pp. 58-97, 2017.
- [16] Atashpaz-Gargari, Esmail, and Caro Lucas. "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition." In *2007 IEEE congress on evolutionary computation*, pp. 4661-4667. Ieee, 2007.

روش GA به نقطه بهینه دست یافته است. شکل ۹ مقایسه‌ای (بی‌بعد، نسبت به تعداد تکرارهای GA) از تعداد تکرارهای این دو روش برای رسیدن به جواب بهینه ارائه داده است. در مجموع و با توجه به شکل-های ۸ و ۹ می‌توان دریافت الگوریتم ICA، که روشی برای حل مسایل بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته است، توانسته در کنار الگوریتم GA به پاسخ مناسبی برای یک مساله بهینه‌سازی با متغیرهای منفصل دست یابد.



شکل ۸- مقادیر بی‌بعد تابع هدف برای دو مثال



شکل ۹- تعداد تکرارهای ICA و GA برای رسیدن به جواب بهینه

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به طراحی بهینه مکانیزم‌های نرم صفحه‌ای پرداخته شده است. برای انجام بهینه‌سازی، فضای طراحی این مکانیزم-های صفحه‌ای با استفاده از المان‌های تیر مدل‌سازی شد. در طی فرایند بهینه‌سازی، هدف پیدا کردن وجود و یا عدم وجود هر یک از این المان-ها بوده است، بگونه‌ای که در نهایت مکانیزم‌هایی با حداکثر میزان تابع هدف به دست آید. برای اجرای فرایند بهینه‌سازی، از دو روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. نتایج مثال‌ها نشان می‌دهد هر دو الگوریتم به یک مکانیزم بهینه دست یافته‌اند، اما در همه موارد روش رقابت استعماری زودتر به مکانیزم بهینه رسیده است. همچنین مقایسه نتایج با مرجع [۱۳] نشان می‌دهد مقادیر مزیت مکانیکی و مزیت هندسی در سه مثال حدوداً بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بهبود یافته‌اند.

۷- مراجع

- [۱] حسن‌زاده ر.، محمدی دانیالی ح. و دردل م.، طراحی مفصل امن منفعل در بازوی ربات با استفاده از مکانیزم چهارمیله‌ای. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۸۹-۹۴، ۱۴۰۰.