

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

# سنتز بهینه مکانیزم‌های نرم دارای تیرهای خمیده

نگارنده: مهدی مختاری کرچگانی

استاد راهنما

دکتر سید مجتبی واردی کولایی

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۲۱۵/۹۸/۲۵  
تاریخ: ۹۸/۱۲/۹

باسمه تعالی



### فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی مختاری کرچکانی با شماره دانشجویی ۹۶۱۳۵۹۴ رشته مهندسی مکترونیك تحت عنوان سنتز بهینه مکانیزم‌های نرم دارای تیرهای خمیده که در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۰۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	<input type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
<input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مجتبی واردی کولابی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مصطفی نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حبیب احمدی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مسعود مهدی زاده رخی	استادیار	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

# تقدیم اثر

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناحتشان به شجاعت می‌گراید

و به پاس محبت‌های بی‌دیشان که هرگز فروکش نمی‌کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم

# شکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند این دوره را به پایان رسانیده‌ام، بر خود واجب می‌دانم از استاد راهنمای بزرگوام دکتر مجتبی واردی کولایی و خوانواده‌ی عزیزم به پاس زحمات بی‌شائبه‌شان در طی انجام این تحقیق سپاسگزاری نمایم.

# تعمیر نامه

اینجانب مهدی مختاری کرچگانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه سنتز بهینه مکانیزم‌های نرم دارای تیرهای خمیده تحت راهنمایی دکتر مجتبی واردی کولایی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

مکانیزم‌های نرم از طبیعت انعطاف‌پذیر خود برای انجام عملیات مکانیکی (مانند انتقال جابجایی و انتقال نیرو) استفاده می‌کنند. این مکانیزم‌ها از نظر عملکردی نسبت به مکانیزم‌های سنتی دارای مزیت‌هایی می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دقت بالاتر، طراحی یکپارچه و هزینه ساخت کمتر اشاره کرد. البته این مکانیزم‌ها دارای محدودیت‌هایی همچون بازه‌ی محدود حرکتی نیز می‌باشند. سنتز بهینه‌ی مکانیزم‌های نرم با در نظر گرفتن تیرهای خمیده و بررسی اثر آن‌ها هدف اصلی این پژوهش است. در طراحی این مکانیزم‌ها معمولاً از تیرهای صاف و لولاهای خمشی استفاده شده است، اما استفاده از تیرهای خمیده می‌تواند موجب بهبود عملکرد آن‌ها شود. وجود و یا عدم وجود المان‌ها در ساختار اولیه و همچنین نوع آن‌ها (تیر مستقیم و یا خمیده) از مهم‌ترین متغیرهای طراحی این مساله بهینه‌سازی هستند. تابع هدف این مساله افزایش مزیت مکانیکی و همچنین افزایش مزیت هندسی این مکانیزم‌ها می‌باشد. در این پژوهش برای استخراج ساختار بهینه مکانیزم نرم از دو روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. همچنین نتایج این دو الگوریتم برای مثال‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. برای تحلیل این مکانیزم‌ها که از المان‌های تیر تشکیل شده‌اند، از روش المان محدود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که وجود تیرهای خمیده در این مکانیزم‌ها موجب بهبود عملکرد آن‌ها و افزایش توابع هدف تعریف شده خواهد شد. همچنین مقایسه دو الگوریتم مورد استفاده نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک که یکی از قوی‌ترین روش‌های موجود در بهینه‌سازی می‌باشد، نتایج بهتری داشته است.

**کلمات کلیدی:** مکانیزم نرم، سنتز بهینه، تیر خمیده، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- مختاری م، واردی کولایی م، "طراحی بهینه یک میکرومکانیزم نرم با استفاده از روش رقابت استعماری"، بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران



# فهرست مطالب

د	فهرست جداول
و	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مکانیزم‌های معمولی و مکانیزم‌های نرم.....
۲	۱-۱-۱ مکانیزم‌های معمولی.....
۳	۲-۱-۱ مکانیزم‌های نرم.....
۴	۳-۱-۱ مزایا و معایب.....
۶	۲-۱ انواع مکانیزم‌های نرم.....
۷	۳-۱ کاربردها.....
۷	۱-۳-۱ تقویت‌کننده‌ها.....
۸	۲-۳-۱ ابزار دقیق.....
۹	۳-۳-۱ سیستم‌های میکروالکترومکانیک.....
۹	۴-۳-۱ ابزارآلات پزشکی.....
۱۰	۵-۳-۱ گریپرها.....
۱۱	۴-۱ تعریف سنتز مکانیزم.....
۱۳	فصل ۲: پیشینه تحقیق
۱۴	۲-۱ مدل‌سازی مکانیزم‌های نرم.....
۱۴	۱-۱-۲ ساختار پیوسته.....

- ۲-۱-۲ ساختار تشکیل شده از المان تیر ..... ۱۵
- ۲-۲ انواع مختلف مکانیزم‌های نرم ..... ۱۵
- ۲-۲-۱ تقویت‌کننده جابجایی ..... ۱۶
- ۲-۲-۲ تقویت‌کننده نیرو ..... ۱۶
- ۲-۲-۳ معکوس‌کننده (نیرو و جابجایی) ..... ۱۷
- ۲-۲-۴ گریپر ..... ۱۸
- ۳-۲ انواع توابع هدف ..... ۱۸
- ۲-۳-۱ توابع هدف بر اساس انرژی کرنشی ..... ۱۹
- ۲-۳-۲ مزیت هندسی ..... ۲۱
- ۲-۳-۳ مزیت مکانیکی ..... ۲۱
- ۲-۳-۴ تولید مسیر ..... ۲۱
- ۴-۲ متغیرهای استفاده شده در سنتز مکانیزم‌های نرم ..... ۲۲
- ۵-۲ روش‌های آنالیز مکانیزم‌های نرم ..... ۲۳
- ۱-۵-۲ مدل جسم شبه‌صلب ..... ۲۳
- ۲-۵-۲ المان محدود ..... ۲۶

### فصل ۳: بهینه‌سازی ۳۵

- ۱-۳ الگوریتم ژنتیک ..... ۳۶
- ۲-۳ الگوریتم رقابت استعماری ..... ۴۰
- ۱-۲-۳ شکل‌دهی امپراطوری اولیه ..... ۴۱
- ۲-۲-۳ سیاست جذب ..... ۴۱
- ۳-۲-۳ انقلاب ..... ۴۱
- ۴-۲-۳ جابجایی مستعمره و استعمارگر ..... ۴۲

۴۲.....رقابت استعماری ۵-۲-۴

۴۳.....سقوط امپراطوری‌های ضعیف ۳-۲-۶

۴۴.....همگرایی ۷-۲-۳

۴۶.....نحوه بهینه‌سازی مکانیزم ۳-۳

۴۹ **فصل ۴: نتایج**

۵۲.....۱-۴ بهینه‌سازی مثال‌های مختلف در حالت اول

۵۲.....۱-۱-۴ مکانیزم معکوس‌کننده نیرو

۵۴.....۲-۱-۴ مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی

۵۸.....۳-۱-۴ مکانیزم تقویت‌کننده نیرو

۶۲.....۲-۴ بهینه‌سازی مثال‌های مختلف در حالت دوم

۶۲.....۱-۲-۴ مکانیزم معکوس‌کننده نیرو

۶۵.....۲-۲-۴ مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی

۶۸.....۳-۲-۴ مکانیزم تقویت‌کننده نیرو

۷۱.....۳-۴ بهینه‌سازی مثال‌های مختلف در حالت سوم

۷۱.....۱-۳-۴ مکانیزم معکوس‌کننده نیرو

۷۵.....۴-۳-۲ مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی

۸۰.....۳-۳-۴ مکانیزم تقویت‌کننده نیرو

۸۷ **فصل ۵: جمع‌بندی**

۹۳ **مراجع**

# فهرست جداول

جدول ۴-۱: متغیرهای در نظر گرفته شده در هر مسئله	۵۰
جدول ۴-۲: تابع هدف مورد نظر در هر مسئله	۵۰
جدول ۴-۳: مشخصات مسئله اول در حالت اول	۵۲
جدول ۴-۴: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۵۳
جدول ۴-۵: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده نیرو	۵۴
جدول ۴-۶: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۵۵
جدول ۴-۷: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی	۵۸
جدول ۴-۸: مشخصات مسئله دوم در حالت اول	۵۸
جدول ۴-۹: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۵۹
جدول ۴-۱۰: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو	۶۲
جدول ۴-۱۱: مشخصات مسئله اول در حالت دوم	۶۲
جدول ۴-۱۲: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۶۳
جدول ۴-۱۳: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده نیرو	۶۴
جدول ۴-۱۴: مشخصات مسئله دوم در حالت دوم	۶۵
جدول ۴-۱۵: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۶۶
جدول ۴-۱۶: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی	۶۸
جدول ۴-۱۷: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۶۹
جدول ۴-۱۸: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی	۷۱
جدول ۴-۱۹: مشخصات مسئله اول در حالت سوم	۷۲
جدول ۴-۲۰: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۷۲
جدول ۴-۲۱: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم رقابت استعماری ) و انسیس برای معکوس کننده نیرو	۷۵
جدول ۴-۲۲: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده نیرو	۷۵
جدول ۴-۲۳: مشخصات مسئله دوم در حالت سوم	۷۶
جدول ۴-۲۴: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری	۷۶

- جدول ۴-۲۵: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( رقابت استعماری ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی ..... ۸۰
- جدول ۴-۲۶: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی ..... ۸۰
- جدول ۴-۲۷: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری ..... ۸۱
- جدول ۴-۲۸: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم رقابت استعماری ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو ..... ۸۵
- جدول ۴-۲۹: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو ..... ۸۵

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمونه‌هایی از مکانیزم‌های معمولی ..... ۳
- شکل ۲-۱. نمونه‌های قدیمی مکانیزم نرم ..... ۴
- شکل ۳-۱. مکانیزم نرم گریپر ..... ۴
- شکل ۴-۱. انواع مکانیزم‌ها ..... ۶
- شکل ۵-۱. تقویت‌کننده پیزوالکتریک ..... ۸
- شکل ۶-۱. مکانیزم نرم موازی که در ابزار دقیق استفاده می‌شود ..... ۸
- شکل ۷-۱. مکانیزم نرمی که در سیستم‌های میکروالکترومکانیک استفاده می‌شود ..... ۹
- شکل ۸-۱. مکانیزم نرم توان‌بخشی مچ پا ..... ۱۰
- شکل ۹-۱. مکانیزم میکرو گریپر ..... ۱۰
- شکل ۱-۲. مدل مش‌های پیوسته ..... ۱۴
- شکل ۲-۲. مدل مش‌بندی شده با تیر ..... ۱۵
- شکل ۳-۲. مسئله معکوس‌کننده ..... ۱۷
- شکل ۴-۲. مسئله گریپر ..... ۱۸
- شکل ۵-۲. دامنه یک ساختار نرم ..... ۱۹
- شکل ۶-۲. شماتیک طراحی مسیر برای مکانیزم نرم صفحه‌ای ..... ۲۲
- شکل ۷-۲. متغیرهای تابع هدف ..... ۲۲
- شکل ۸-۲. مدل شبه‌صلب ..... ۲۳
- شکل ۹-۲. مدل شبه‌صلب ..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲. مدل تیر و مدل شبه‌صلب ..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲. مدل شبه‌صلب برای تیر خمیده ..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲. نمونه‌ای از مکانیزم نرم همراه با لولای خمشی ..... ۲۷
- شکل ۱۳-۲. تیر صاف ..... ۲۸
- شکل ۱۴-۲. تیر منحنی ..... ۳۱
- شکل ۱-۳. کروموزوم و ژن ..... ۳۷
- شکل ۲-۳. نمونه‌ای از عملگر تقاطع ..... ۳۸
- شکل ۳-۳. تقاطع دو نقطه‌ای ..... ۳۸
- شکل ۴-۳. جهش ..... ۳۸
- شکل ۵-۳. فلوچارت الگوریتم ژنتیک ..... ۳۹
- شکل ۶-۳. سیاست جذب ..... ۴۱

- شکل ۳-۷. جابجایی مستعمره و استعمارگر ..... ۴۲
- شکل ۳-۸. رقابت استعماری ..... ۴۳
- شکل ۳-۹. حذف امپراطوری‌های ضعیف ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۰. فلوچارت اگوریتیم رقابت استعماری ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱. انواع تیر منحنی ..... ۴۷
- شکل ۴-۱. دامنه‌ی اولیه برای طراحی مکانیزم معکوس‌کننده‌ی نیرو ..... ۵۱
- شکل ۴-۲. دامنه‌ی اولیه برای طراحی مکانیزم تقویت‌کننده‌ی نیرو و جابجایی ..... ۵۱
- شکل ۴-۳. مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۵۲
- شکل ۴-۴: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۵۳
- شکل ۴-۵: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس ..... ۵۴
- شکل ۴-۶: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۵۵
- شکل ۴-۷: تابع هدف (مزیت هندسی) بر حسب تکرار ..... ۵۶
- شکل ۴-۸: جابجایی در راستای محور X ..... ۵۷
- شکل ۴-۹: جابجایی در راستای Y ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲: جابجایی در راستای محور X ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳: جابجایی در راستای Y ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۵: تابع هدف بر حسب تکرار ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۸: تابع هدف (مزیت هندسی) بر حسب تکرار ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۹: جابجایی در راستای محور X ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۰: جابجایی در راستای Y ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۱: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۶۸
- شکل ۴-۲۲: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۳: جابجایی در راستای محور X ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۴: جابجایی در راستای Y ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۵: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۶: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۷: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتیم رقابت استعماری) ... ۷۴

- شکل ۴-۲۸: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک) ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۹: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۷۶
- شکل ۴-۳۰: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۷۷
- شکل ۴-۳۱: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در راستای x (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری) ..... ۷۸
- شکل ۴-۳۲: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در راستای y (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری) ..... ۷۸
- شکل ۴-۳۳: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک) ..... ۷۹
- شکل ۴-۳۴: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک) ..... ۷۹
- شکل ۴-۳۵: مکانیزم به‌دست آمده از بهینه‌سازی ..... ۸۱
- شکل ۴-۳۶: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار ..... ۸۲
- شکل ۴-۳۷: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در راستای x (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری) ..... ۸۳
- شکل ۴-۳۸: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در راستای y (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری) ..... ۸۳
- شکل ۴-۳۹: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک) ..... ۸۴
- شکل ۴-۴۰: تحلیل جابجایی مدل به‌دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک) ..... ۸۴
- شکل ۵-۱: مقایسه بی‌بعد مقادیر تابع هدف برای اول ..... ۸۹
- شکل ۵-۲: مقایسه بی‌بعد مقادیر تابع هدف برای مثال دوم ..... ۸۹
- شکل ۵-۳: مقایسه بی‌بعد مقادیر تابع هدف برای مثال سوم ..... ۹۰
- شکل ۵-۴: مقایسه بی‌بعد تعداد تکرارهای ICA و GA برای رسیدن به جواب بهینه ..... ۹۱
- شکل ۵-۵: مقایسه بی‌بعد تعداد تکرارهای ICA و GA برای رسیدن به جواب بهینه ..... ۹۱



# فصل ۱ : مقدمه

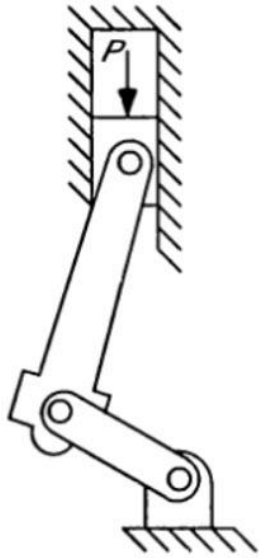
به مجموعه‌ای از میله‌ها یا اجزای صلب (لینک‌ها) که به یکدیگر مفصل شده‌اند و یا با هم در تماس هستند، بطوری که حرکت یکی نسبت به دیگری امکان‌پذیر باشد، زنجیره سینماتیکی گفته می‌شود. مکانیزم یک زنجیره سینماتیکی مقید است که برای تبدیل حرکت یا انتقال آن از جسمی به جسم دیگر طراحی شده است.

## ۱-۱ مکانیزم‌های معمولی و مکانیزم‌های نرم

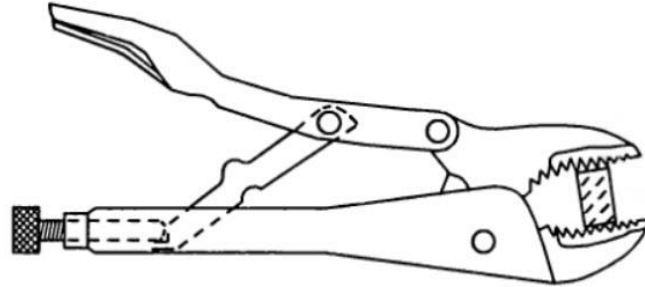
مکانیزم‌های متداول سنتی نیرو و جابجایی را از طریق اعضای صلب (سفتی زیاد) و مفاصل سنتی (دارای نرمی زیاد) منتقل می‌کردند. با توجه به اینکه سال‌های بسیاری در زمینه تئوری و کاربرد آن‌ها تحقیق و مطالعه انجام شده است، روابط مربوط به آن‌ها پیشرفت بسیار خوبی داشته است. طی دو دهه اخیر محققان با گنجاندن نرمی در تئوری‌های طراحی مکانیزم‌ها، به سیستم‌های جدیدی بنام مکانیزم‌های نرم دست یافته‌اند که نیرو و جابجایی را از طریق اعضای قابل انعطاف خود منتقل می‌کنند. در مقایسه با مکانیزم‌های سنتی، این مکانیزم‌ها دارای عضوهای نرم‌تر و مفاصل سفت‌تر هستند. همچنین این مکانیزم‌ها می‌توانند بصورت یکپارچه و بدون مفصل باشند.

### ۱-۱-۱ مکانیزم‌های معمولی

مکانیزم‌های معمولی از اعضای صلب (مانند لینک‌ها) و مفاصل تشکیل شده‌اند. دو نمونه از مکانیزم‌های معمولی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در شکل ۱-۱-الف یک مکانیزم لنگ لغزنده نشان داده شده است. این مکانیزم جابجایی دورانی ورودی را به جابجایی خطی در خروجی تبدیل می‌کند. همچنین در شکل ۱-۱-ب یک مکانیزم گریپر نشان داده شده است که حرکت دورانی ورودی را به حرکت دورانی در خروجی تبدیل می‌کند [۱].



الف) مکانیزم لنگ و لغزنده



ب) مکانیزم گریپر

شکل ۱-۱. نمونه‌هایی از مکانیزم‌های معمولی [۱]

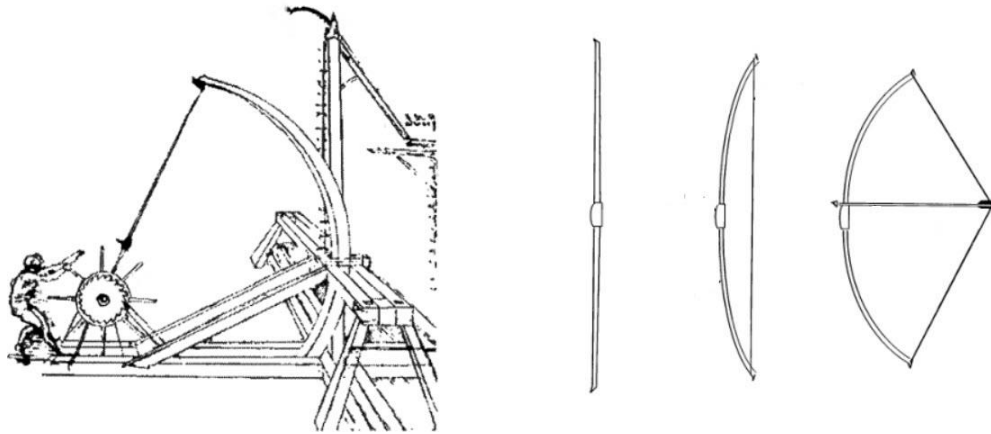
## ۲-۱-۱ مکانیزم‌های نرم<sup>۱</sup>

مکانیزم‌های نرم، مکانیزم‌هایی هستند که انتقال جابجایی و نیرو را از طریق تغییر شکل اجزای نرم و انعطاف‌پذیر خود انجام می‌دهند. این مکانیزم‌ها از ساختارهای موجود در طبیعت الهام گرفته‌اند. در ادامه چند مثال آورده شده است.

قلب موجودات زنده نمونه‌ای از ساختارهای انعطاف‌پذیر است. استخوان‌ها، غضروف‌ها و ماهیچه‌ها نمونه‌های از اجزای انعطاف‌پذیر هستند، در حالی که در تحلیل‌های دینامیکی معمولاً به حالت لینک‌های صلب در نظر گرفته می‌شوند. برگ‌ها، گل‌ها و ساقه‌هایشان همگی اجزای انعطاف‌پذیر هستند [۱].

این مکانیزم‌ها در گذشته هم مورد استفاده قرار می‌گرفته است. از کاربردهای قدیمی این مکانیزم‌ها می‌توان ابزارالات نظامی همچون تیر و کمان و منجنیق‌ها اشاره کرد.

<sup>۱</sup> Compliant mechanism



شکل ۲-۱. نمونه‌های قدیمی مکانیزم نرم [۱]

در واقع در این دو نمونه از انعطاف‌پذیری ساختارها به منظور هدفی خاص استفاده شده است. برخی از مکانیزم‌های معمولی، نمونه‌های مشابه در مکانیزم‌های نرم دارند. به عنوان مثال می‌توان به گریپر<sup>۱</sup> شکل ۱-۱ اشاره کرد. معادل مکانیزم نرم این گریپر در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱. مکانیزم نرم گریپر [۱]

### ۳-۱-۱ مزایا و معایب

در این قسمت به ذکر مزایا و معایب مکانیزم‌های نرم و مکانیزم‌های معمولی پرداخته می‌شود. از مزایای مکانیزم‌های معمولی می‌توان به بازه‌ی حرکتی زیاد آن‌ها اشاره کرد که به دلیل وجود مفاصل می‌باشد. همان‌طور که مفاصل مزایایی برای مکانیزم‌ها به ارمغان می‌آورند، مشکلاتی را نیز به وجود

<sup>۱</sup> Gripper

می‌آورند. به دلیل وجود لقی ( هر چند کم ) در مفاصل، مفاصل بعد از مدتی دچار خوردگی و فرسایش می‌شوند. در نتیجه از دقت مکانیزم‌ها کاسته می‌شود. همچنین هزینه‌ی ساخت، نگهداری و تعمیرات این نوع مکانیزم‌ها به خصوص برای کارهایی با اهداف دقت بالا، بسیار زیاد است. در نتیجه محققین در دو (سه) دهه‌ی اخیر توجه بیشتری به مکانیزم‌های نرم داشته‌اند.

به طور کلی، مهمترین مزایای مکانیزم‌های نرم نسبت به مکانیزم‌های معمولی عبارتند از:

۱- یکپارچه‌بودن: مکانیزم‌های نرم تمام حرکت خود را از بدنه‌ی انعطاف‌پذیر به‌دست می‌آورند، معمولاً به صورت یک‌پارچه ساخته می‌شوند و نیازی به مونتاژ اجزای مختلف ندارند.

۲- نبود اصطکاک: با توجه به عدم وجود مفاصل در این نوع مکانیزم، سایش میان اجزای این مکانیزم وجود ندارد.

۳- عدم نیاز به روانکاری: عدم وجود اصطکاک و مفاصل در این مکانیزم‌ها، نیازی به روانکاری را از بین می‌برد.

۴- ساخت آسان: با توجه به یک‌پارچه بودن مکانیزم‌های نرم و عدم نیاز به مونتاژ، معمولاً ساخت آن‌ها نسبت به مکانیزم‌های معمولی آسان‌تر می‌باشد. همچنین هزینه‌ی ساخت آن‌ها نسبت به مکانیزم‌های معمولی نیز کم‌تر است.

۵- تعمیرات و نگهداری: مکانیزم‌های نرم معمولاً نیازی به تعمیرات خاصی ندارند و با توجه به هزینه‌ی پایین ساختشان در صورت معیوب شدن دوباره ساخته می‌شوند.

با توجه به موارد ذکر شده، مکانیزم‌های نرم دقت بالاتری نسبت به مکانیزم‌های معمولی دارند و به ندرت از دقت آن‌ها کاسته می‌شود.

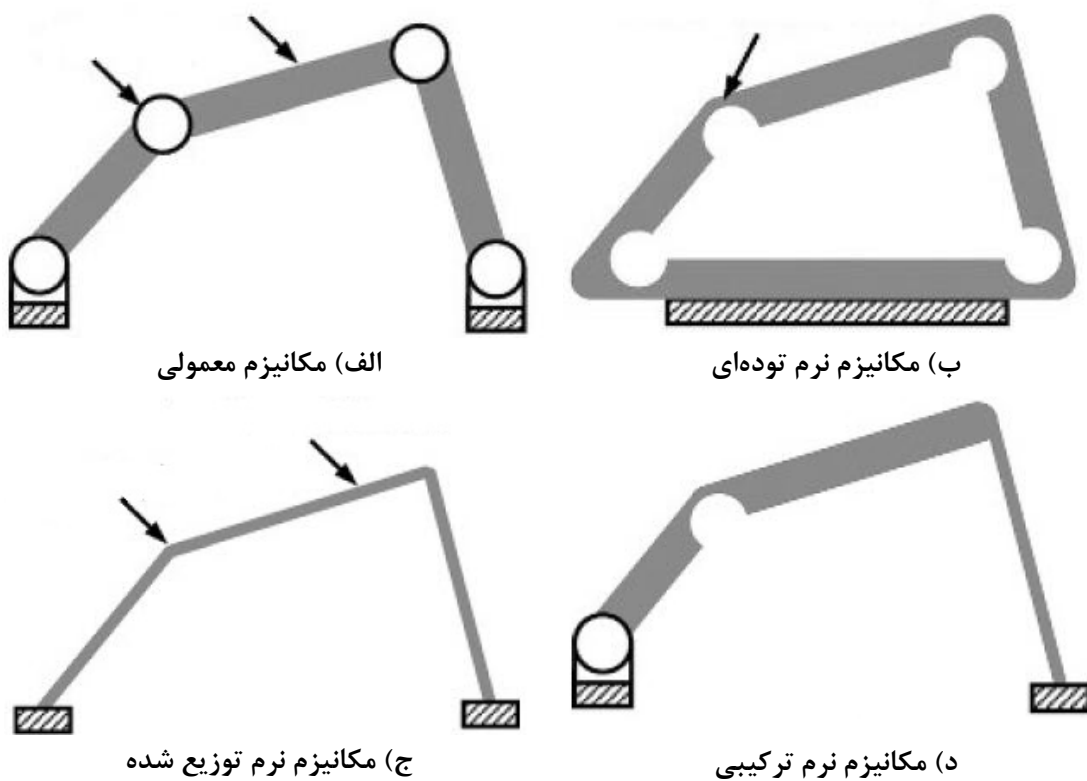
در حالی که مکانیزم‌های نرم مزیت‌های قابل توجهی دارند مشکلاتی نیز دارند. از مهم‌ترین مشکلات استفاده از مکانیزم‌های نرم نیز می‌توان به بازه‌ی حرکتی محدود و انتقال نیرو کم نسبت به مکانیزم‌های معمولی اشاره کرد. به عنوان مثال می‌توان به مکانیزم لنگ و لغزنده اشاره کرد که ورودی به صورت بی‌نهایت توانایی جابجایی دورانی را دارد در صورتی که هیچ مکانیزم نرمی توانایی جابجایی بی‌نهایت را

ندارند.

همین امر چالشی می‌باشد که طراحان این مکانیزم‌ها باید در نظر بگیرند و تا حد امکان بر این مشکل غلبه نمایند.

## ۲-۱ انواع مکانیزم‌های نرم

مکانیزم‌های نرم نیز با توجه به نوع حرکت به سه دسته تقسیم می‌شوند. این سه دسته در شکل ۴-۱ نشان داده شده‌اند [۲]. این مکانیزم‌ها عبارت‌اند از: ۱- مکانیزم نرم توده‌ای ۲- مکانیزم نرم توزیع شده ۳- مکانیزم نرم ترکیبی



شکل ۴-۱. انواع مکانیزم‌ها [۲]

مکانیزم نرم توده‌ای: یک مکانیزم معمولی شامل لینک‌ها و مفاصل می‌باشد. حال اگر مفاصل با اتصالات نرم (لولای خمشی<sup>۱</sup>) جای خود را عوض کنند مکانیزم به دست آمده را مکانیزم نرم توده‌ای می‌نامند. نمونه‌ای از آن در شکل ۱-۴-ب نشان داده شده است. حرکت این مکانیزم‌ها به خاطر وجود این اتصالات نرم می‌باشد.

مکانیزم نرم توزیع شده: در این گونه مکانیزم‌ها هیچگونه لولای خمشی وجود ندارد. جابجایی این مکانیزم به طور کامل نتیجه تغییر شکل تیرها می‌باشد. نمونه‌ای از این مکانیزم در شکل ۱-۴-ج نشان داده شده است.

مکانیزم نرم ترکیبی: این مکانیزم نرم، ترکیبی از مکانیزم نرم توده‌ای، مکانیزم نرم توزیع شده و مکانیزم معمولی می‌باشد که نمونه‌ای از این مکانیزم در شکل ۱-۴-د نشان داده شده است.

## ۳-۱ کاربردها

این مکانیزم‌ها، کاربردهای زیادی در صنایع و آزمایشگاه‌ها دارند. مکانیزم‌های نرم معمولاً به صورت مکانیزم‌های صفحه‌ای ساخته می‌شوند ولی در برخی موارد به صورت مکانیزم‌های سه بعدی (۶ درجه آزادی) نیز ساخته می‌شوند [۳]. از جمله کاربردهای مکانیزم‌های نرم می‌توان به تقویت کننده‌ها [۴]، ابزار دقیق [۵-۷]، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی [۴ و ۸]، ابزارآلات پزشکی [۹-۱۱]، گریپرها [۱۲-۱۵]، میکروماشینکاری‌ها [۱۶-۱۹]، میکروسکوپ‌ها [۲۰-۲۲] و سنسورها [۲۳] اشاره کرد. در ادامه به توضیح برخی از این موارد پرداخته می‌شود.

### ۱-۳-۱ تقویت کننده‌ها<sup>۲</sup>

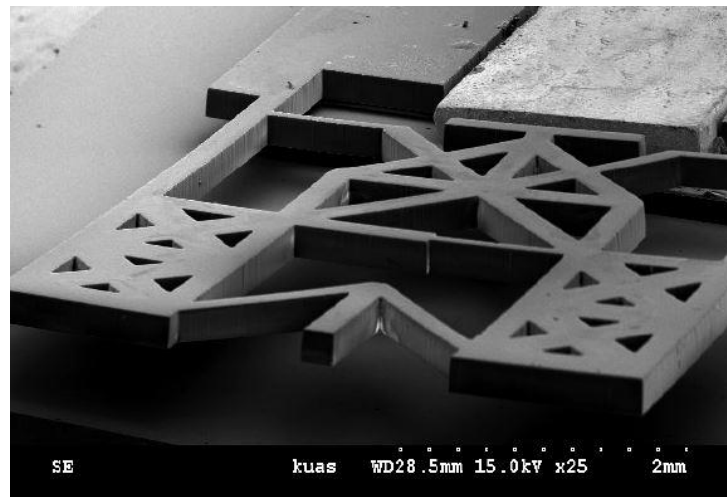
فعال کننده‌هایی مانند پیزوالکتریک‌ها، آلیاژهای حافظه‌دار، محرک‌های گرمایی و مغناطیسی کاربردهای زیادی در مهندسی دارند. با این حال این فعال کننده‌ها از نظر حرکتی، بازه حرکتی کمی دارند. بنابراین

---

<sup>۱</sup> hing

<sup>۲</sup> amplifier

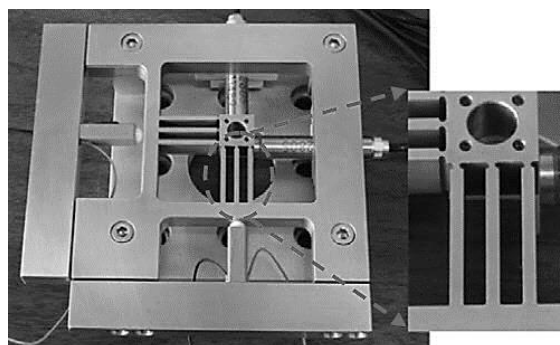
از مکانیزم‌های نرم برای تقویت بازه حرکتی و نیروی خروجی فعال‌کننده‌ها استفاده می‌شود. همچنین این مکانیزم‌ها دارای خطای کم و دقت بالا می‌باشد. هنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۴] یک مکانیزم صفحه‌ای نرم برای تقویت نیروی پیزوالکتریک طراحی کردند. در شکل ۵-۱، این مکانیزم صفحه‌ای نیز نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. تقویت‌کننده پیزوالکتریک [۴]

### ۱-۳-۲ ابزار دقیق

این مکانیزم‌ها به دلیل عدم وجود مفاصل دقت بالایی دارند در نتیجه از آن‌ها در مهندسی ابزار دقیق استفاده‌های زیادی می‌شود. شکل ۶-۱ نمونه‌ای از مکانیزم نرم موازی که در ابزار دقیق استفاده می‌شود را نشان می‌دهد.

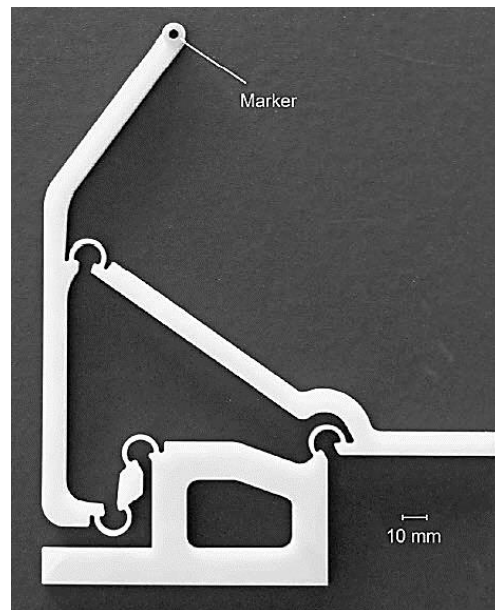


شکل ۶-۱. مکانیزم نرم موازی که در ابزار دقیق استفاده می‌شود [۱۷]



### ۳-۳-۱ سیستم‌های میکروالکترومکانیک

به دلیل وجود قطعات با اندازه‌های کوچک در سیستم‌های میکروالکترومکانیک، مونتاژ این قطعات کار دشواری می‌باشد. در نتیجه از مکانیزم‌های نرم که احتیاجی به مونتاژ ندارند می‌توان در این موارد استفاده نمود. شکل ۷-۱ نمونه‌ای از کاربرد مکانیزم‌های نرم در سیستم‌های میکروالکترومکانیک را نشان می‌دهد.



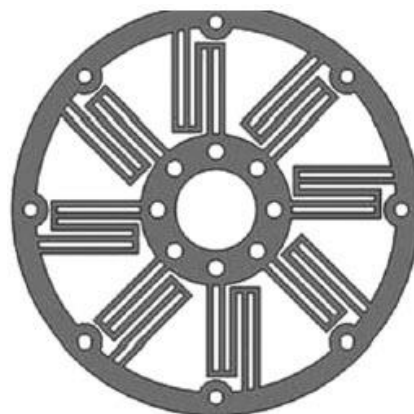
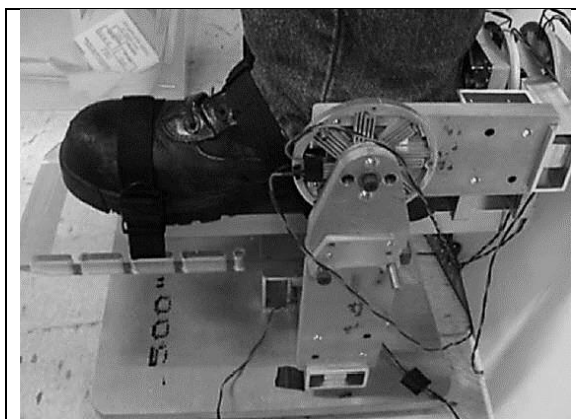
شکل ۷-۱. مکانیزم نرمی که در سیستم‌های میکروالکترومکانیک استفاده می‌شود [۸]

### ۴-۳-۱ ابزار آلات پزشکی

این مکانیزم‌ها، بدلیل عدم وجود اصطکاک و همچنین عدم نیاز به روغن کاری و روان کاری، قابلیت استفاده در وسایل جراحی و پزشکی را دارند علاوه بر این، این مکانیزم‌ها نیازی به مونتاژ ندارند. بنابراین این مکانیزم‌ها کمترین خطرات را برای بیماران دارند و می‌توان در ساخت تجهیزات جراحی و تجهیزات توان بخشی از آنها استفاده کرد.

نمونه‌ای از یک مکانیزم نرم که در توان بخشی مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل ۸-۱ نشان داده

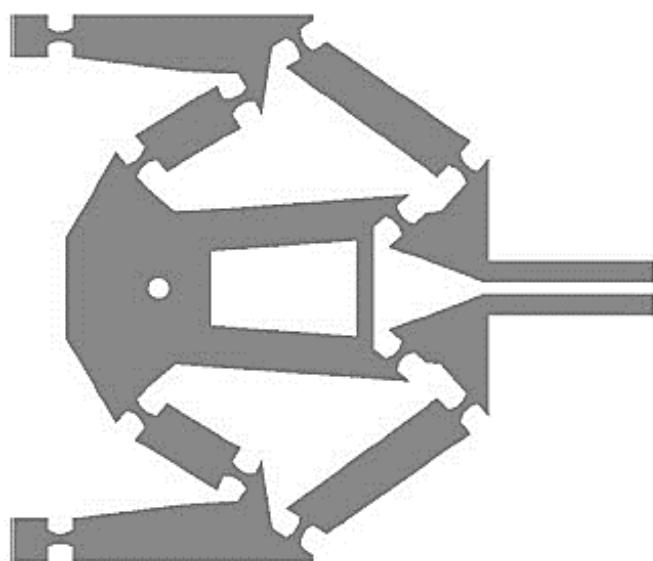
شده است.



شکل ۸-۱. مکانیزم نرم توان بخشی مچ پا [۷]

### ۵-۳-۱-۱ گریپرها

گریپرها ابزارهایی برای گرفتن اجسام می‌باشند. گریپرهای نرم در کاربردهایی در مقیاس‌های مختلف ( میکرومتر و میلیمتر ) و معمولا در آزمایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌ای از گریپر نرم در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۹-۱. مکانیزم میکرو گریپر [۱۲]

## ۴-۱ تعریف سنتز مکانیزم

منظور از سنتز (ترکیب) مکانیزم طراحی یا ایجاد مکانیزمی برای دستیابی به یک مجموعه مشخصه‌های حرکتی بر اساس پارامترهای طراحی می‌باشد. به عبارت دیگر متغیرهای طراحی به گونه‌ای تعیین می‌شوند که مکانیزم مناسبی با توجه به اهداف طراحی به دست آید. این طراحی معمولاً بصورت یک مساله بهینه‌سازی مدل‌سازی می‌شود بگونه‌ای که پارامترهای هندسی مکانیزم، متغیرهای طراحی این مساله را تشکیل می‌دهند و تابع هدف مساله می‌تواند تولید یک مسیر مطلوب، ایجاد یک سفتی مشخص، تولید مکانیزمی با زوایای انتقال مناسب و ... باشد. معمولاً برای حل این مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود.

موضوع این پژوهش سنتز یک مکانیزم نرم (دارای اعضای انعطاف‌پذیر) برای ایجاد حداکثر نسبت جابجایی و حداکثر نسبت نیرو می‌باشد. برای حل این مساله بهینه‌سازی از الگوریتم‌های رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

مهمترین اهداف این پژوهش عبارتند از:

- بررسی اثر تیرهای خمیده در مکانیزم‌های نرم
- استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری (که الگوریتم نسبتاً جدیدی می‌باشد) در سنتز این مکانیزم‌ها
- سنتز مکانیزم نرم براساس پارامترهای طراحی (شعاع - ضخامت - نوع تیر)



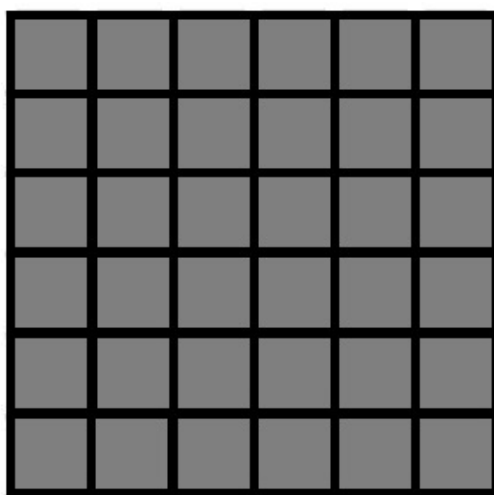
## فصل ۲: پیشینه تحقیق

## ۱-۲ مدل سازی مکانیزم های نرم

بهینه سازی ساختار<sup>۱</sup> مکانیزم های نرم یک روش معمول برای طراحی این گونه مکانیزم ها می باشد. در این روش متغیرهای طراحی مساله بهینه سازی (که شامل وجود یا عدم وجود المان ها، ضخامت ها و ...) به گونه ای تعیین می شوند که بهترین مقدار برای تابع هدف را به دنبال داشته باشند. به صورت کلی دو ساختار مختلف برای مدل سازی این مکانیزم ها می توان در نظر گرفت. تفاوت این دو ساختار در چگونگی مدل سازی المان ها است.

### ۱-۱-۲ ساختار پیوسته

همان طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است ساختار اولیه شامل تعداد زیادی از المان های چند ضلعی است. در حالی که شبکه بندی ساختارهای پیوسته معمولاً به صورت مربعی صورت می گیرد، شبکه بندی های دیگر همچون شبکه های شش ضلعی نیز وجود دارد.



شکل ۱-۲. مدل مش های پیوسته

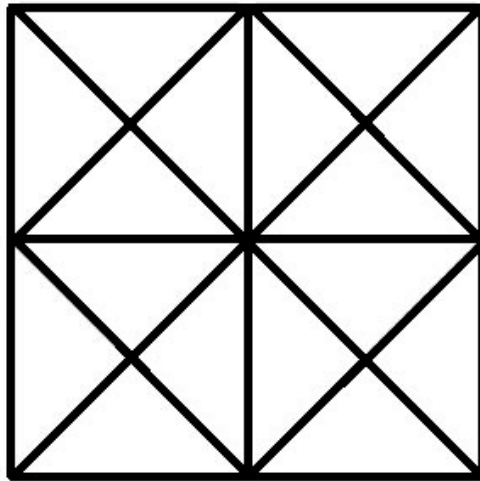
برخی محققین از ساختارهای پیوسته در سنتز مکانیزم های نرم استفاده کردند [۱۵ و ۲۰ و ۲۴-۲۵].

---

<sup>۱</sup> Topology optimization

## ۲-۱-۲ ساختار تشکیل شده از المان تیر<sup>۱</sup>

همان طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است هر المان بصورت یک تیر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هر المان نیروی محوری، نیروی عرضی و گشتاور را تحمل می‌کند. در نتیجه تحلیل این ساختار-ها همانند تحلیل قاب‌ها می‌باشد.



شکل ۲-۲. مدل مش‌بندی شده با تیر

برخی محققین از ساختارهای تشکیل شده از المان تیر در سنتز مکانیزم‌های نرم استفاده کردند [۱۵ و ۲۶-۲۹].

## ۲-۲ انواع مختلف مکانیزم‌های نرم

مکانیزم‌های نرم مورد استفاده در کاربردهای مختلف را می‌توان براساس کارکردشان به چندین دسته تقسیم‌بندی نمود:

- مکانیزم‌های تقویت‌کننده جابجایی
- مکانیزم‌های تقویت‌کننده نیرو
- مکانیزم‌های معکوس‌کننده (نیرو و جابجایی)

<sup>۱</sup> Ground structure

• گریپر

کارکرد مکانیزم‌ها در هر یک از موارد فوق متفاوت است، در نتیجه نوع مساله بهینه‌سازی مرتبط با آن‌ها متفاوت خواهد بود که در ادامه به توضیح مختصری از آن‌ها ارائه خواهد شد.

## ۲-۲-۱ تقویت‌کننده جابجایی

هدف از این نوع مسائل، به حداکثر رساندن جابجایی در نقطه‌ی مورد نظر نسبت به جابجایی در نقطه ورودی است [۲۶-۲۹]. به عبارت دیگر مکانیزم‌های تقویت‌کننده‌ی جابجایی، حساسیت بالایی نسبت به جابجایی ورودی دارند. همین امر موجب می‌شود این مکانیزم‌ها در سنسورهای اندازه‌گیری جابجایی یا تقویت‌کننده‌های جابجایی مورد استفاده قرار گیرند.

آرون کومار<sup>۱</sup> یک روش طراحی، برای طراحی مکانیزم‌های نرم معرفی کرد [۲۶]. ساکسنا<sup>۲</sup> یک تابع هدف جدید برای مکانیزم‌های تقویت‌کننده جابجایی معرفی کرد [۲۷]. لین کائو<sup>۳</sup> به بررسی اثر لولاهای خمشی در طراحی مکانیزم‌های تقویت‌کننده جابجایی پرداخت [۲۸]. ندیم دیاب<sup>۴</sup> به طراحی مکانیزم‌های نرم پرداخت و در این راستا از الگوریتم مورچگان نیز استفاده کرد. همچنین یک تابع هدف جدید برای طراحی مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی معرفی کرد [۲۹].

## ۲-۲-۲ تقویت‌کننده نیرو

هدف از این نوع مسائل، به حداکثر رساندن نیرو در نقطه‌ی مورد نظر است [۲۸]. به بیان دقیق‌تر در این‌گونه مسائل لزوماً نیروی خروجی نسبت به نیروی ورودی افزایش پیدا نمی‌کند بلکه نیروی خروجی به بیشترین میزان ممکن خود خواهد رسید. همچنین قابل ذکر است که مکانیزم‌های تقویت‌کننده‌ی

---

<sup>۱</sup> Arunkumar

<sup>۲</sup> Saxena

<sup>۳</sup> Lin Cao

<sup>۴</sup> Nadim diab



نیرو، حساسیت بالایی نسبت به نیروی ورودی دارند. همین امر موجب می‌شود این مکانیزم‌ها در سنسور- های اندازه‌گیری نیرو یا تقویت‌کننده‌های نیرو برای فعال‌کننده‌ها (پیزوالکتریک‌ها) مورد استفاده قرار گیرند. لین کائو [۲۸]. به بررسی اثر لولاهای خمشی در طراحی مکانیزم‌های تقویت‌کننده نیرو پرداخت.

### ۳-۲-۲ معکوس‌کننده<sup>۱</sup> (نیرو و جابجایی)

هدف از این‌گونه مسائل معکوس کردن جهت خروجی (نیرو یا جابجایی) نسبت به ورودی (نیرو یا جابجایی) می‌باشد [۱۵ و ۲۴-۲۹]. در واقع اجزای مکانیزم به گونه‌ای کنار یکدیگر قرار خواهند گرفت که جهت خروجی و ورودی مخالف هم باشند. در شکل ۳-۲ نمونه‌ای از این مسائل نشان داده شده است.

روبن آنسولو<sup>۲</sup> با استفاده از مدل ساختار پیوسته مکانیزم معکوس‌کننده طراحی کرد [۲۴]. آنرود کریشناکومار<sup>۳</sup> یک روش جدید برای طراحی مکانیزم‌های نرم معرفی نمود و یک مکانیزم معکوس‌کننده با استفاده از روش معرفی شده طراحی کرد [۲۵]. لین کائو [۲۸] به بررسی اثر لولاهای خمشی در طراحی مکانیزم‌های تقویت‌کننده جابجایی پرداخت.



شکل ۳-۲. مسئله معکوس‌کننده

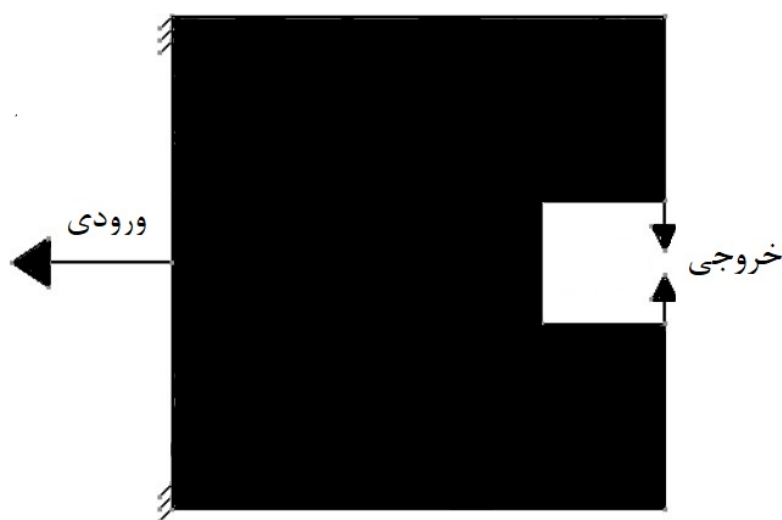
<sup>۱</sup> Inverter

<sup>۲</sup> Rubén Ansola

<sup>۳</sup> Anirudh Krishnakumar

## ۴-۲-۲ گریپر

هدف از مکانیزم گریپر گرفتن اجسام است [۱۵]. دامنه‌ی اولیه‌ی طراحی گریپرهای نرم در پژوهش‌ها اغلب به صورت شکل ۴-۲ در نظر گرفته می‌شود. هر چند که گریپرهای نرم صفحه‌ای در ابعاد متفاوتی طراحی و ساخته می‌شوند ولی معمولاً برای کاربردهایی در حد میکرون طراحی می‌شوند. دیپاک<sup>۱</sup> و همکاران به طراحی مکانیزم‌های معکوس‌کننده و گریپر پرداخت [۱۵].



شکل ۴-۲. مسئله گریپر

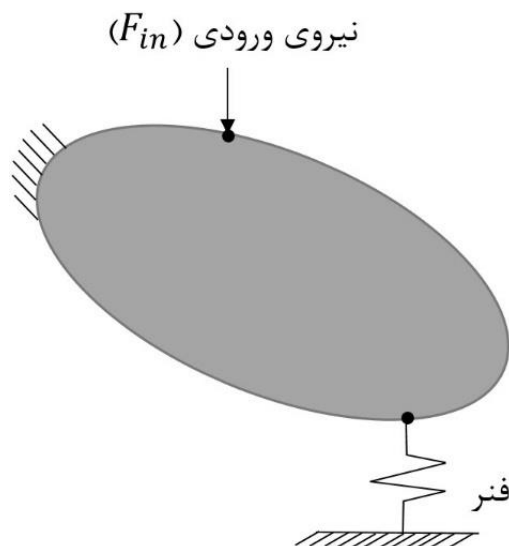
## ۳-۲ انواع توابع هدف

در راستای سنتز بهینه‌ی مکانیزم‌های نرم و با توجه به انواع مختلف این مکانیزم‌ها از نظر کاربرد، محققین توابع هدف مختلفی معرفی نموده‌اند و از آن‌ها در سنتز مکانیزم‌های نرم استفاده کرده‌اند. در ادامه به معرفی چند تابع هدف مختلف پرداخته خواهد شد.

<sup>۱</sup> Sangamesh R. Deepak

## ۲-۳-۱ توابع هدف بر اساس انرژی کرنشی<sup>۱</sup>

برخی محققین از تابع هدف جدیدی که بر پایه انرژی کرنشی هستند، استفاده کردند. مکانیزم‌های نرم باید دو ویژگی انعطاف‌پذیری و سفتی را همزمان دارا باشند. زیرا انعطاف‌پذیری مناسب باعث دامن‌های حرکتی بیشتر و سفتی مناسب باعث استحکام مکانیزم حین انجام عملیات مکانیکی می‌شود. در شکل ۲-۵ دامن‌های یک ساختار نرم نشان داده شده است.



شکل ۲-۵. دامن‌های یک ساختار نرم

با اعمال نیروی واحد مجازی  $(F_d)$ ، جابجایی مکانیزم در قسمت خروجی برابر  $\delta_{out\ put}$  خواهد بود. بنابراین کار مجازی که انرژی کرنشی متقابل<sup>۲</sup> نامیده می‌شود برابر معادله (۲-۱) خواهد بود.

$$MSE = F_d \delta_{out\ put} \quad (۱-۲)$$

که در رابطه‌ی بالا با توجه به این که اندازه‌ی نیروی مجازی واحد می‌باشد، نتیجه خواهد شد:

$$MSE = \delta_{out\ put} \quad (۲-۲)$$

همچنین انرژی ذخیره شده که انرژی کرنشی نامیده می‌شود نیز برابر معادله (۲-۳) خواهد بود.

$$SE = \frac{1}{2} u_{in}^T K u_{in} = \frac{1}{2} F_{in} u_{in} \quad (۳-۲)$$

<sup>۱</sup> Strain energy

<sup>۲</sup> Mutual strain energy

با استفاده از روابط ذکر شده محققین معادلاتی را به عنوان توابع هدف معرفی نمودند که به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود.

آنانتاسورس [۳۰] تابع هدف جدیدی را پیشنهاد کرد که انرژی کرنشی متقابل را بیشینه و انرژی کرنشی را کمینه می‌کند. این تابع هدف در معادله‌ی (۴-۲) بیان شده است.

$$-\omega.MSE + (1 - \omega).SE \quad 0 < \omega < 1 \quad (4-2)$$

که در معادله (۴-۲)،  $\omega$  ضریب وزنی است. با کمینه سازی این معادله انرژی کرنشی متقابل به حداکثر مقدار خود و انرژی کرنشی به حداقل مقدار خود می‌رسند. یکی از مشکلات این معادله وجود ضریب  $\omega$  است که طراح باید آن را تعیین کند. به دست آوردن بهترین مقدار برای این ضریب کار دشواری می‌باشد و نیاز به آزمون و خطاهای زیادی دارد در نتیجه محققین به بررسی توابع دیگری پرداختند تا این مشکل تا حد امکان برطرف شود.

ساکسنا و آنانتاسورس برای غلبه بر این مشکل تابع هدف جدیدی معرفی نمودند که در معادله (۵-۲) نشان داده شده است [۳۱].

$$-sign \frac{\frac{1}{2}MSE^3}{SE} \quad (5-2)$$

آن‌ها تابع هدف دیگری را معرفی کردند که در معادله (۶-۲) معرفی شده است [۱]. با بیشینه‌سازی این تابع هدف مقدار انرژی کرنشی متقابل افزایش و مقدار انرژی کرنشی کاهش می‌یابد. در نتیجه انعطاف‌پذیری مکانیزم نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

$$\frac{MSE}{SE} \quad (6-2)$$

## ۲-۳-۲ مزیت هندسی<sup>۱</sup>

در راستای رسیدن به بیشینه نسبت جابجایی خروجی به جابجایی ورودی در یک مکانیزم تقویت جابجایی، محققین از تابع هدف معروفی به نام مزیت هندسی استفاده کرده‌اند [۲۵-۲۶ و ۲۸].

$$GA = \frac{U_{\text{خروجی}}}{U_{\text{ورودی}}} \quad (۷-۲)$$

## ۳-۳-۲ مزیت مکانیکی<sup>۲</sup>

همچنین برای ایجاد بیشینه نسبت نیروی خروجی به نیروی ورودی در یک مکانیزم تقویت نیرو، محققین از تابع هدف دیگری به نام مزیت مکانیکی استفاده کرده‌اند [۱۵ و ۲۶ و ۲۸].

$$MA = \frac{K U_{\text{خروجی}}}{F_{\text{ورودی}}} \quad (۸-۲)$$

دیپاک و همکاران چندین مکانیزم را با استفاده از تابع هدف مزیت مکانیکی طراحی کردند. او در این راستا از مدل ساختار پیوسته و مدل ساختار تشکیل شده از تیر استفاده کرد [۱۵]. لین کائو با استفاده از تابع هدف مزیت مکانیکی و مزیت مکانیکی، مکانیزم معکوس کننده و تقویت کننده نیرو طراحی کرد [۲۸].

## ۴-۳-۲ تولید مسیر<sup>۳</sup>

برخی محققین از مکانیزم‌های نرم در طراحی مسیر برای نقطه‌ی هدف نیز استفاده کرده‌اند. همان‌طور که در معادله‌ی (۹-۲) نشان داده شده است تابع هدف تعیین شده در این مسائل کمینه کردن میانگین فاصله بین نقاط مطلوب و نقاط تولید شده توسط مکانیزم می‌باشد [۲].

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (۹-۲)$$

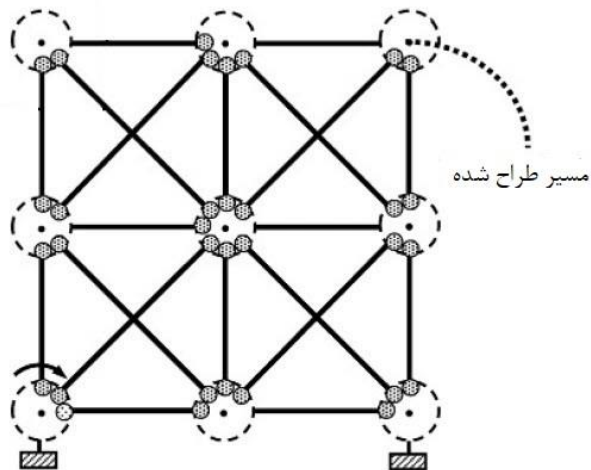
---

<sup>۱</sup> Geometric advantage

<sup>۲</sup> Mechanical advantage

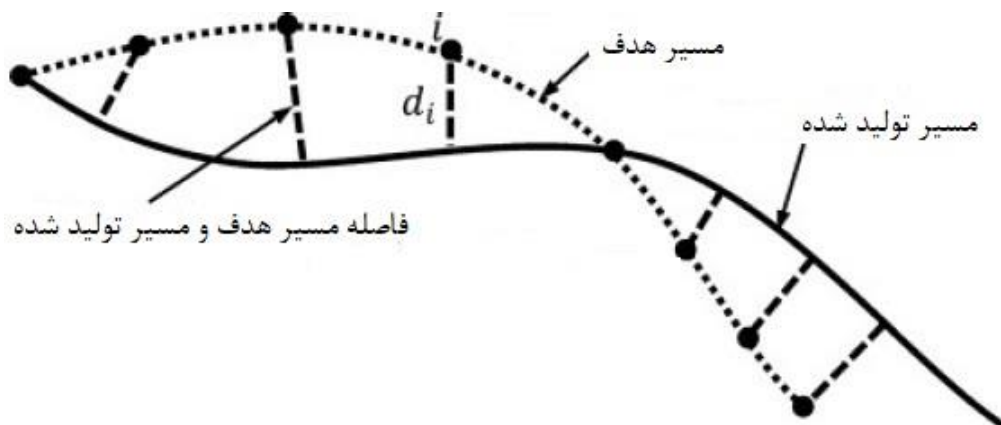
<sup>۳</sup> Path generation

که  $n$  تعداد نقاطی می‌باشد که نقطه‌ی هدف باید از آن‌ها عبور کند. همچنین  $d$  فاصله‌ی نقطه‌ی هدف تا نقطه تولید شده توسط مکانیزم می‌باشد. در شکل ۶-۲ شماتیکی از این مکانیزم‌ها نشان داده شده است.



شکل ۶-۲. شماتیک طراحی مسیر برای مکانیزم نرم صفحه‌ای [۲]

شکل ۷-۲ نحوه محاسبه خطای میان نقاط دقت و نقاط تولید شده توسط مکانیزم را در یک مساله تولید مسیر نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲. متغیرهای تابع هدف [۲]

## ۴-۲ متغیرهای استفاده شده در سنتز مکانیزم‌های نرم

در پژوهش‌های گذشته محققین متغیرهای زیر را در سنتز مکانیزم‌های نرم در نظر گرفته‌اند.

۱- استفاده از چند جنس متفاوت در طراحی یک مکانیزم نرم [۳۲]

۲- استفاده از لولاهای خمشی در طراحی این مکانیزم‌ها

۳- استفاده از ضخامت‌های متفاوت در طراحی این مکانیزم‌ها

در این تحقیق متغیرهای جدیدی تحت عنوان تیرهای خمیده وارد این گونه مسائل شده است. در واقع نوآوری این پژوهش استفاده از تیرهای خمیده در سنتز بهینه‌ی مکانیزم‌های نرم است.

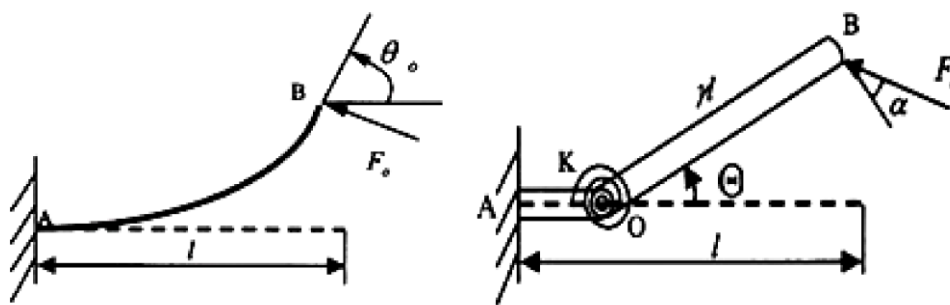
## ۲-۵ روش‌های آنالیز مکانیزم‌های نرم

برای تحلیل مکانیزم‌های نرم از روش‌هایی همچون مدل شبه‌جسم‌صلب<sup>۱</sup> و المان محدود استفاده می‌شود.

### ۲-۵-۱ مدل جسم شبه‌صلب

در مدل شبه‌جسم‌صلب، که مدل معروف و پرکاربردی در تحلیل این مکانیزم‌ها است، هر تیر انعطاف‌پذیر بوسیله چند لینک صلب و چند فنر پیچشی مدل‌سازی می‌شود [۳۳-۳۴].

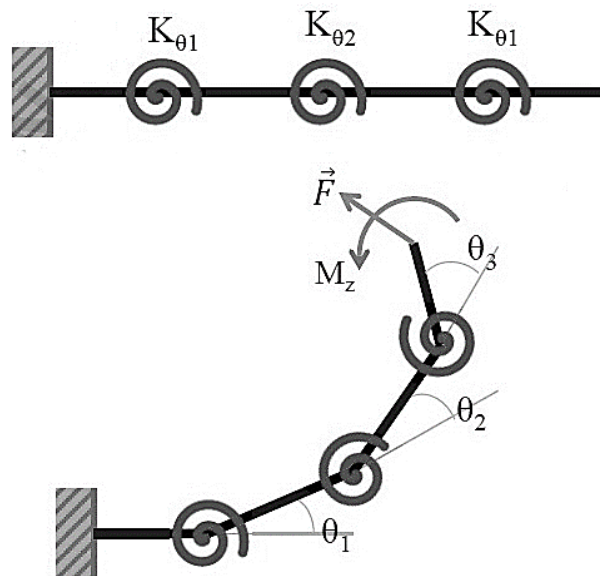
این مدل اولین بار توسط هاول [۱] و بصورت شکل ۲-۸ ارائه شده است. این مدل بعدها با افزوده شدن تعداد بیشتری از فنرهای پیچشی توسعه یافت.



شکل ۲-۸. مدل شبه‌صلب [۱]

<sup>۱</sup> Pseudo rigid body model

کالپاتی<sup>۱</sup> و همکاران [۳۳] ضریب سفتی فنرها را به گونه ای تعیین کردند که مجموعه ی لینکها و فنرها رفتاری مشابه تیر انعطاف پذیر داشته باشد. برای درک بهتر، نمونه ای از این مدل سازی در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.

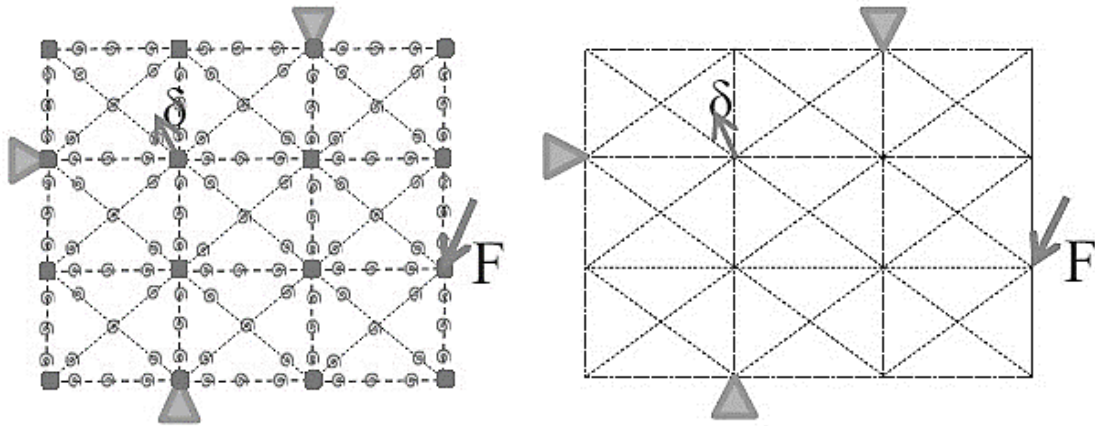


شکل ۹-۲. مدل شبه صلب [۳۳]

کالپاتی و همکاران [۳۳] نیز از روش شبه صلب برای مدل سازی تیرها استفاده کردند. در این روش یک تیر به چند لینک صلب و چند فنر تبدیل شده و ضرایب سفتی هر فنر از طریق بهینه سازی تعیین شده است. در ادامه سوارن از این مدل خود در طراحی مکانیزم های نرم استفاده کرده و نتایج خود را با نرم افزارهای المان محدود صحت سنجی کرده است.

<sup>۱</sup> Venkatasubramanian Kalpathy



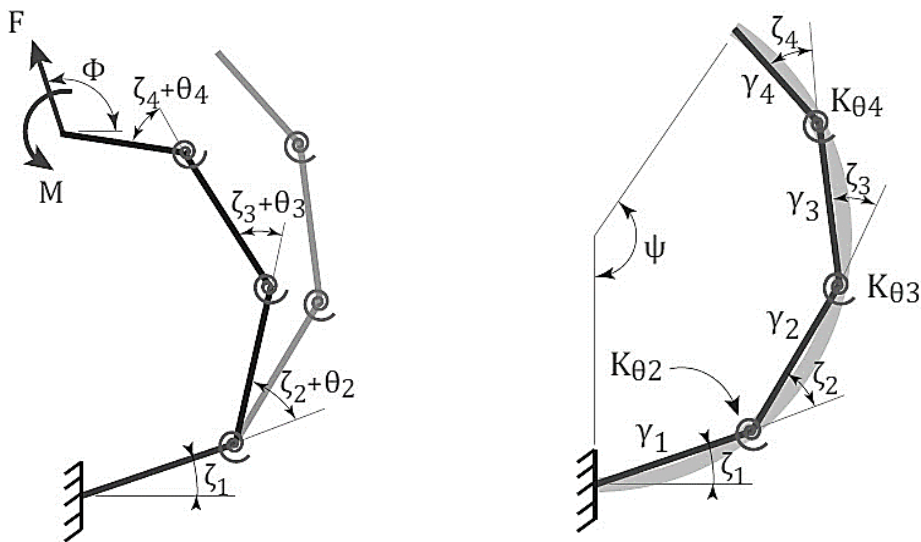


الف) مدل تیر

ب) مدل شبه‌صلب

شکل ۱۱-۲. مدل تیر و مدل شبه‌صلب [۳۳]

کالیپاتی و همکاران از روش مدل شبه‌صلب برای تحلیل تیرهای خمیده استفاده کرده‌اند [۳۵-۳۶]. در این روش تیر منحنی شکل به چند لینک صلب و چند فنر تبدیل شده و سپس ضرایب سفتی فنر با استفاده از بهینه‌سازی به گونه‌ای به دست می‌آید که رفتار کلی مجموعه لینک‌ها و فنرها مشابه یک تیر خمیده باشد. نمونه‌ای از این مسائل در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است.



الف) قبل از تغییر شکل

ب) بعد از تغییر شکل

شکل ۱۱-۲. مدل شبه‌صلب برای تیر خمیده [۳۵]

## ۲-۵-۲ المان محدود

روش المان محدود در مسائلی چون تحلیل سازه‌ها، انتقال حرارت، دینامیک سیالات و الکترومغناطیس کاربرد دارد. برای حل این‌گونه مسائل از طریق روش تحلیلی، باید جواب چندین مسئله مقدار مرزی را برای معادلات دیفرانسیل به دست آورد.

روش المان محدود مسئله مورد نظر را به یک دستگاه معادلات جبری تبدیل می‌کند. این روش مقادیر تخمینی پارامترهای مجهول را برای تعدادی نقاط مجزا در محدوده تعریف مسئله به دست می‌آورد.

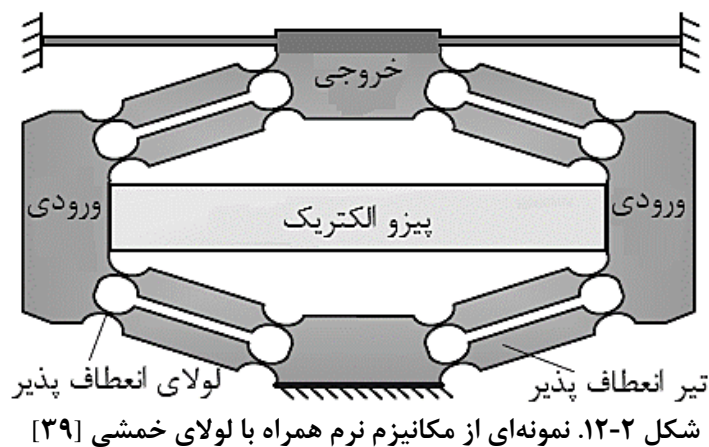
راه حل المان محدود، تقسیم مسائل بزرگ به بخش‌های کوچک‌تر و ساده‌تری به نام المان محدود است. در مرحله‌ی بعد معادلات ساده‌ای که معرف این المان‌های محدود هستند، در یک دستگاه معادلات بزرگ‌تر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و فرم کلی مسئله اصلی را تشکیل می‌دهند. فرآیند کلی حل مسئله در روش المان محدود دارای دو مرحله است. در ابتدا، محدوده مسئله به مجموعه‌ای از محدوده‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. هر یک از این محدوده‌های کوچک بیان‌گر یک دستگاه معادلات مختص به هر یک از المان‌ها هستند. در ادامه، تمام این دستگاه‌ها به منظور انجام محاسبات نهایی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. این دستگاه معادلات کلی را می‌توان با استفاده از مقادیر اولیه مسئله اصلی حل کرد و نتایج عددی مربوط به آن را به دست آورد [۳۷].

بسیاری از شاخه‌های مهندسی مکانیک نظیر علوم وابسته به هوانوردی، بیومکانیک و صنایع خودروسازی برای طراحی و توسعه محصولات خود از روش المان محدود کمک می‌گیرند. امروزه، مجموعه‌های نرم‌افزاری المان محدود، توانایی در نظر گرفتن شرایط ویژه دمایی، الکترومغناطیسی، مواد سیال و سازه‌ها را دارند. در شبیه‌سازی سازه‌ها، المان محدود در به تصویر کشیدن سفتی و مقاومت مواد و همچنین به حداقل رساندن وزن مواد به کار گرفته شده و در نتیجه کاهش هزینه ساخت و سازه کمک فوق‌العاده‌ای می‌کند. همچنین روش المان محدود ساخت، اصلاح و بهینه‌سازی طراحی‌ها را پیش از شروع تولید

امکان پذیر می‌کند.

محققین برای تحلیل مکانیزم‌های نرم از روش المان محدود استفاده می‌کنند. برخی محققین به بررسی تیرهای مستقیم و همچنین لولاهای خمشی پرداخته‌اند. برخی دیگر از محققین به بررسی تیرهای خمیده پرداخته‌اند. یپینگ شن<sup>۱</sup> و همکاران روش عددی مبتنی بر المان محدود را برای چند نوع از لولاهای خمشی ارائه نمودند [۳۸].

مینیانگ لینگ<sup>۲</sup> و همکاران روش‌های المان محدود را برای حل‌های دینامیکی و استاتیکی مکانیزم‌های نرم ارائه دادند. همچنین برای لولاهای خمشی دایروی و بیضی شکل، ماتریس سفتی ارائه کردند [۳۹]. در نتیجه هر لولای خمشی یک المان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان از لولاهای خمشی و صاف به طور همزمان در طراحی مکانیزم‌های نرم استفاده کرد. همچنین با توجه به روابط ارائه شده می‌توان به تحلیل استاتیکی و دینامیکی این مکانیزم‌های ترکیبی پرداخت.



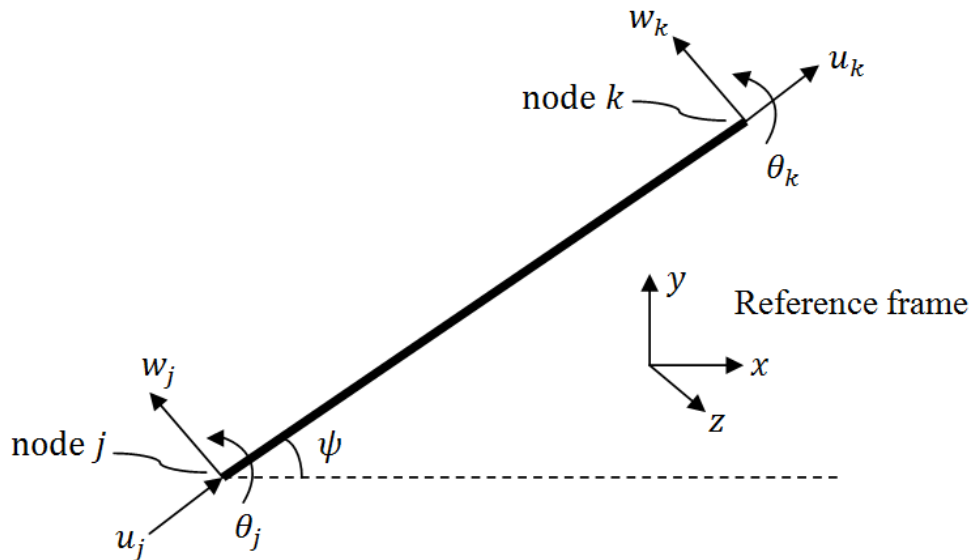
با توجه به این که در این پژوهش از روش المان محدود استفاده شده است در ادامه به شرح روابط آن پرداخته می‌شود.

<sup>۱</sup> Yiping Shen

<sup>۲</sup> Mingxiang Ling

## ۲-۵-۱ تیر صاف

در شکل ۲-۱۳ یک تیر صاف نشان داده شده است. هر تیر دارای شش درجه آزادی می باشد. درجه آزادی‌ها شامل دو جابجایی محوری  $u_j$  و  $u_k$ ، دو جابجایی عرضی  $w_j$  و  $w_k$  و دو جابجایی خمشی  $\theta_j$  و  $\theta_k$  می باشد.



شکل ۲-۱۳. تیر صاف

در نتیجه بردار جابجایی در مختصات محلی برابر معادله (۲-۱۰) می باشد.

$$\{q_i^e\} = [u_j \ w_j \ \theta_j \ u_k \ w_k \ \theta_k]^T \quad (۲-۱۰)$$

که  $j$  و  $k$  بیان گر گره‌های سری در یک ساختار می باشد. همچنین  $e$  و  $T$  به ترتیب بیانگر یک المان و ترانزاده می باشند. با فرض تغییر شکل‌های الاستیک خطی و جابجایی‌های کوچک، بردار جابجایی‌های

درون المان به کمک توابع شکل با بردار جابجایی‌های گره‌ای بیان می شود [۳۹].

$$\{q_i\} = \begin{bmatrix} u(x, t) \\ w(x, t) \\ \theta(x, t) \end{bmatrix} = [N(x)] \cdot \{q_i^e\} = \begin{bmatrix} N_u(x) \\ N_w(x) \\ N'_w(x) \end{bmatrix} \cdot \{q_i^e\} \quad (۲-۱۱)$$

در معادله‌ی بیان شده  $N(x)$  تابع شکل است که دارای یک بردار شامل سه سطر و شش ستون می باشد.

برای یک المان جابجایی محوری با فرض جابجایی کوچک برابر معادله‌ی (۲-۱۲) خواهد بود.

$$u(x) = a_0 + a_1x \quad (۲-۱۲)$$

با اعمال شرایط مرزی  $u(0) = u_j$  و  $u(l_i) = u_k$  ضرایب و برابر معادله (۱۳-۲) خواهد بود.

$$a_0 = u_j \quad (13-2)$$

$$a_1 = (u_k - u_j)/l_i$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$u(x) = \left(1 - \frac{x}{l_i}\right)u_j + \frac{x}{l_i}u_k = N_u(x) \cdot \{q_i^e\} \quad (14-2)$$

در نتیجه  $N_u(x)$  برابر معادله (۱۵-۲) خواهد بود.

$$N_u(x) = \left[1 - \frac{x}{l_i}, 0, 0, \frac{x}{l_i}, 0, 0\right] \quad (15-2)$$

برای جابجایی عرضی، یک چند جمله‌ای درجه سه خواهیم داشت.

$$w(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (16-2)$$

با اعمال شرایط مرزی  $w(0) = w_j$ ،  $w(l_i) = w_k$ ،  $w'(0) = \theta_j$  و  $w'(l_i) = \theta_k$  جابجایی برابر

(۱۷-۲) خواهد بود.

$$w(x) = (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3)w_j + l_i(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)\theta_j + (3\xi^2 - 2\xi^3)w_k + l_i(\xi^3 - \xi^2)\theta_k \quad (17-2)$$

که  $\xi = x/l_i$  می‌باشد. همچنین تابع شکل برابر معادله (۱۸-۲) خواهد بود.

$$N_w(x) = [0, (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3), l_i(\xi - 2\xi^2 + \xi^3), (3\xi^2 - 2\xi^3), l_i(\xi^3 - \xi^2)] \quad (18-2)$$

با مشتق‌گیری از این معادله نسبت به  $x$  معادله شکل  $N_\theta(x)$  به دست می‌آید.

انرژی پتانسیل المان  $i$  ام برابر معادله (۱۹-۲) است.

$$U_i^e = \frac{1}{2} \int_0^h EA_i(x) \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + EI_i(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x}\right)^2 dx \quad (19-2)$$

در نتیجه معادله‌ی زیر به دست می‌آید.

$$U_i^e = \frac{1}{2} \{q_i^e\}^T \cdot \int_0^h EA_i(x) [N_u'(x)]^T [N_u'(x)] + EI_i(x) [N_w''(x)]^T [N_w''(x)] dx \cdot \{q_i^e\} \quad (20-2)$$

که نتیجه‌ی این معادله برابر خواهد بود با معادله (۲۱-۲) خواهد بود.

$$U_i^e = \frac{1}{2} \{q_i^e\}^T \cdot K_s \cdot \{q_i^e\} \quad (21-2)$$

که  $K_s$  ماتریس سفتی تیر  $i$  ام می‌باشد.

بردار جابجایی در مختصات کلی برای دو گره‌ی موجود در یک تیر به قرار زیر می‌باشد.

$$q_j = [u_j \ w_j \ \theta_j] \quad (22-2)$$

$$q_k = [u_k \ w_k \ \theta_k]$$

در نتیجه جابجایی‌های کلی در مختصات مرجع برابر معادله‌ی (23-2) می‌باشد.

$$X = [q_j \ q_k]^T \quad (23-2)$$

با محاسبه‌ی جابجایی گره‌ها به کمک توابع شکل تئوری تیر اویلر برنولی و جایگذاری آن‌ها در رابطه

انرژی پتانسیل، ماتریس سفتی هر المان به شکل معادله (24-2) به دست می‌آید [39].

$$K_s = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ & & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ & & & EA/L & 0 & 0 \\ & Sym & & & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ & & & & & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (24-2)$$

که پارامترهای  $E$ ،  $A$ ،  $L$  و  $I$  به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، مساحت سطح مقطع، طول و ممان دوم

سطح مقطع تیر می‌باشند.

## ۲-۲-۵-۲ تیر منحنی

برای بررسی تیرهای منحنی، راه‌های متفاوتی وجود دارد.

هر تیر منحنی شکل را می‌توان معادل چند تیر صاف در نظر گرفت و آن را طبق معادلات تیر صاف

حل نمود. ولی استفاده از این روش در این تحقیق راه مناسبی نمی‌باشد زیرا تعداد و مکان تیرهای

خمیده با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تعیین می‌شود در نتیجه پیاده‌سازی با استفاده از این روش

سخت است همچنین چون تعداد تیرها زیاد می‌باشد هزینه زمانی بیشتری نسبت به یک تیر صرف حل

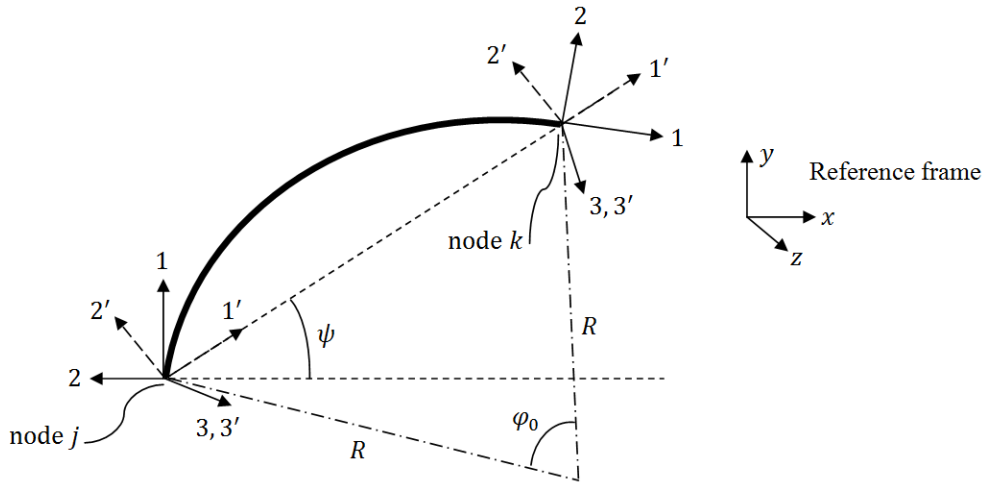
این مسئله خواهد شد.

پالایناتان و همکاران روشی برای به دست آوردن ماتریس سفتی یک تیر خمیده ارائه نموده است که

حل این گونه مسائل را نیز آسان تر می کند [۴۰].

همان طور که در شکل ۲-۱۴. تیر منحنی نشان داده شده است تیر منحنی همانند تیر صاف شامل

دو گره می باشد که هر گره شامل سه درجه آزادی می باشد.



شکل ۲-۱۴. تیر منحنی

ماتریس سفتی هر المان ( تیر منحنی ) طبق معادله ی (۲-۲۵) ب دست می آید.

$$K'_c = \begin{bmatrix} K_{II} & K_{IJ} \\ K_{JI} & K_{JJ} \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

همچنین ماتریس نرمی  $a$  در معادله (۲-۲۶) نشان داده شده است.

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

که در معادله بالا هر درایه به قرار زیر می باشد [۴۰].

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{RN}{2EA} + \frac{CR^3}{2EI} & a_{22} &= \frac{RB}{2EA} + \frac{BR^3}{2EI} \\ a_{12} &= \frac{RD}{2EA} + \frac{SR^3}{EI} & a_{23} &= \frac{HR^2}{EI} \\ a_{13} &= \frac{FR^2}{EI} & a_{33} &= \frac{R\varphi_0}{EI} \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$N = \varphi_0 + \frac{\sin 2\varphi_0}{2} \quad C = \frac{3}{4} - \cos \varphi_0 + \frac{\cos 2\varphi_0}{4}$$

$$B = \varphi_0 - \frac{\sin 2\varphi_0}{2} \quad F = \sin \varphi_0 - \varphi_0$$

$$C = 3\varphi_0 - \frac{\sin 2\varphi_0}{2} - 4\sin\varphi_0 \quad H = \cos\varphi_0 - 1$$

$$D = \frac{\cos 2\varphi_0}{2} - \frac{1}{2}$$

با معکوس گیری از ماتریس  $a$  زیرماتریس سفتی  $K_{II}$  به دست می آید. ماتریس نرمی  $b$ ، با تفاوت جزئی همانند ماتریس  $a$  می باشد این تفاوت شامل موارد زیر می باشد.

$$b_{12} = -a_{12}$$

(۲۸-۲)

$$b_{23} = -a_{23}$$

با معکوس گیری از ماتریس  $b$  زیرماتریس سفتی  $K_{JJ}$  به دست می آید.

ماتریس (۲۹-۲) ارتباطی بین نیرو در گره  $i$  و گره  $j$  برقرار می کند [۴۰].

$$\bar{T}_c = \begin{bmatrix} -\cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & -\cos\varphi_0 & 0 \\ R(1 - \cos\varphi_0) & R\sin\varphi_0 & -1 \end{bmatrix} \quad (۲۹-۲)$$

زیرماتریس های  $K_{JI}$  و  $K_{IJ}$  طبق معادله (۳۰-۲) به دست می آیند.

$$K_{JI} = \bar{T}_c K_{II}$$

(۳۰-۲)

$$K_{IJ} = (K_{JI})^T$$

در نتیجه با استفاده از چهار زیرماتریس  $K_{II}$ ،  $K_{IJ}$ ،  $K_{JI}$  و  $K_{JJ}$  طبق معادله (۲۵-۲) ماتریس سفتی تیر خمیده در مختصات محلی به دست می آید.

برای تبدیل مختصات محلی ( 1 و 2 و 3 ) ماتریس سفتی به مختصات محلی ( 1' و 2' و 3' ) از

ماتریس دوران استفاده می شود که در معادله (۳۱-۲) نشان داده شده است [۴۰].



$$T_c = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi_0}{2} & -\sin \frac{\varphi_0}{2} & 0 & & & \\ \sin \frac{\varphi_0}{2} & \cos \frac{\varphi_0}{2} & 0 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \\ & & & \cos \frac{\varphi_0}{2} & -\sin \frac{\varphi_0}{2} & 0 \\ & & & \sin \frac{\varphi_0}{2} & \cos \frac{\varphi_0}{2} & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31-2)$$

بنابراین ماتریس سفتی در مختصات محلی جدید را می‌توان به صورت معادله (۳۲-۲) نوشت.

$$K_c = (T_c)^T K_c' T_c \quad (32-2)$$

### ۲-۵-۲-۳ ماتریس سفتی در مختصات کلی

در این قسمت به تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی پرداخته می‌شود. در معادله (۳۳-۲) ماتریس دوران بیان شده است [۳۹].

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & \sin \psi_i & 0 & & & \\ -\sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \\ & & & \cos \psi_i & \sin \psi_i & 0 \\ & & & -\sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33-2)$$

که  $\psi_i$  زاویه‌ی تیر  $i$  ام با مختصات مرجع است. همچنین ماتریس موقعیت  $P_i$ ، ماتریسی است که برای اسمبل کردن سفتی محلی المان‌ها ( $K_i^e$ ) برای ساخت ماتریس سفتی کلی ( $K$ ) استفاده می‌شود. این ماتریس طبق معادله‌ی (۳۴-۲) تعریف می‌شود [۳۹].

$$P_i = \begin{matrix} \text{گره‌ی شماره } j \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & \\ \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & & 1 & 0 & 0 & \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix} \\ \uparrow \\ \text{گره‌ی شماره } k \end{matrix} \quad (34-2)$$

در نتیجه ماتریس سفتی در مختصات مرجع با معادله (۳۵-۲) برابر است [۳۹].

$$K_{3m \times 3m} = \sum_{i=1}^n \text{transpose}(P_i) \text{transpose}(T_i) K_i^e T_i P_i \quad (35-2)$$

که  $n$  و  $m$  به ترتیب تعداد گره‌ها و تعداد المان‌ها می‌باشد.

جابجایی و نیرو در مختصات مرجع به ترتیب  $u$  و  $F$  است. تحلیلی استاتیکی طبق معادله زیر محاسبه

خواهد شد [۳۹].

$$F = Ku \quad (36-2)$$

در نتیجه جابجایی طبق معادله (۳۷-۲) زیر به سادگی به دست می‌آید.

$$u = FK^{-1} \quad (37-2)$$

در نتیجه دو نوع تیر صاف و منحنی را می‌توان در طراحی مکانیزم‌های نرم استفاده نمود و آن‌ها را

تحلیل کرد.

## فصل ۳: بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین جواب‌های موجود با توجه به محدودیت‌ها و شرایط مسئله می‌باشد. برای یک مسئله ممکن است چندین جواب وجود داشته باشد که برای مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر تابعی به نام تابع هدف تعیین می‌شود. در این راستا محققین الگوریتم‌هایی تحت عنوان الگوریتم‌های فرا ابتکاری را به وجود آوردند.

الگوریتم‌های فرا ابتکاری لزوماً بهترین جواب (حل دقیق) را نتیجه نمی‌دهند ولی در جستجوی حل نزدیک به حل دقیق هستند. یکی از مهمترین ویژگی‌های این الگوریتم‌ها رسیدن به جواب بهینه در بازه‌ی زمانی مناسب می‌باشد. هرکدام از الگوریتم‌های موجود الهام گرفته شده از طبیعت، فیزیک یا انسان‌ها می‌باشد. از معروف‌ترین و بهترین الگوریتم‌های موجود می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم مورچگان اشاره کرد. هر سه الگوریتم ذکر شده الهام گرفته شده از طبیعت می‌باشند.

در این تحقیق از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری استفاده شده است. که در ادامه به توضیح این دو الگوریتم پرداخته می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری الگوریتم نسبتاً جدیدی است که در این مدت کوتاه قدرت خود را نشان داده است. الگوریتم ژنتیک نیز جزو الگوریتم‌های مشهور، قدیمی و توانمند در حوزه بهینه‌سازی است.

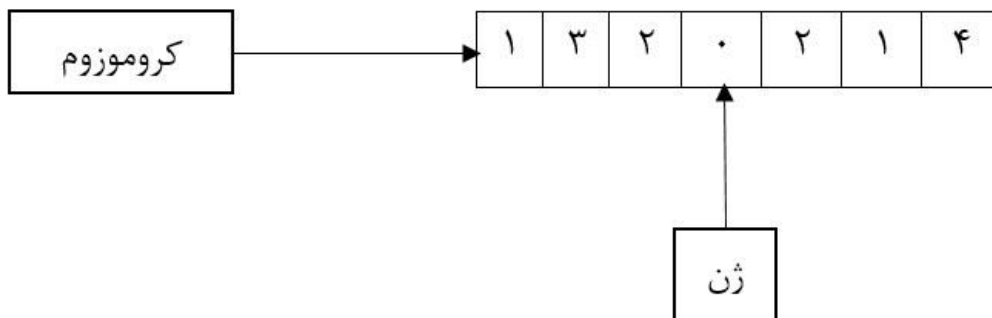
### ۳-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، الگوریتمی الهام گرفته از نظریه تکامل داروین می‌باشد که براساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعت است [۴۱]. این الگوریتم یک الگوریتم پیشینه‌ساز می‌باشد. محققین از این الگوریتم در مسائل مختلف مهندسی از جمله کنترل، یادگیری ماشین و ... استفاده کرده‌اند. در ابتدا در مورد نظریه داروین توضیح مختصری داده می‌شود سپس به مدل سازی این الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود.

براساس نظریه داروین، افراد یک جامعه (انسان‌ها، حیوانات، حشرات، گیاهان و ...) که از طریق زاد و

ولد نسل جدیدی به وجود می‌آورند دارای ویژگی‌های زیر می‌باشند [۴۱].

- ۱- شانس بقا به قدرت (نحوهی ترکیب کروموزومها) آن نسل بستگی دارد.
  - ۲- در تعداد کمی از افراد این نسلها جهش‌هایی رخ خواهد داد.
  - ۳- در اکثر موارد این جهش‌ها مناسب نبوده و آن افراد با طبیعت سازگاری ندارند.
  - ۴- در موارد نادر، افرادی با سازگاری بالاتر تولید خواهد شد.
  - ۵- در نتیجه به افراد قوی‌تر فرصت بقا داده خواهد شد و افراد ضعیف‌تر به مرور از بین خواهند رفت
  - ۶- به مرور زمان افراد این نسلها تکامل خواهند یافت.
- حال با توجه به موارد ذکر شده به توضیح الگوریتم اصلی پرداخته خواهد شد.
- جمعیت اولیه: جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده به هر سطر از جمعیت، کروموزوم و به هر درایه، ژن گفته می‌شود.



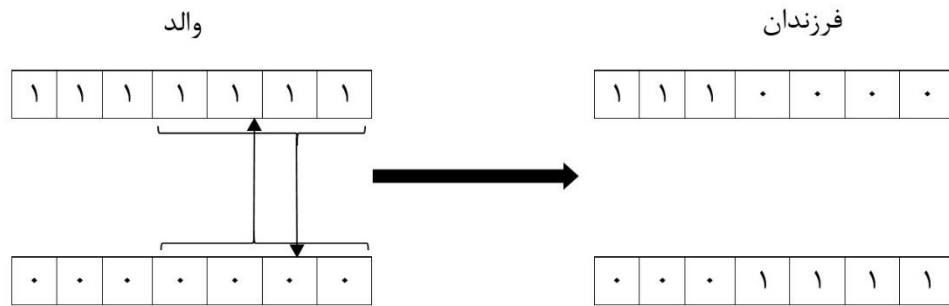
شکل ۱-۳. کروموزوم و ژن

الگوریتم ژنتیک دارای سه عملگر می‌باشد. عملگر تولید مجدد، عملگر تقاطع و عملگر جهش سه عملگر اصلی الگوریتم ژنتیک است که در ادامه بصورت مختصر به توضیح این سه عملگر پرداخته می‌شود.

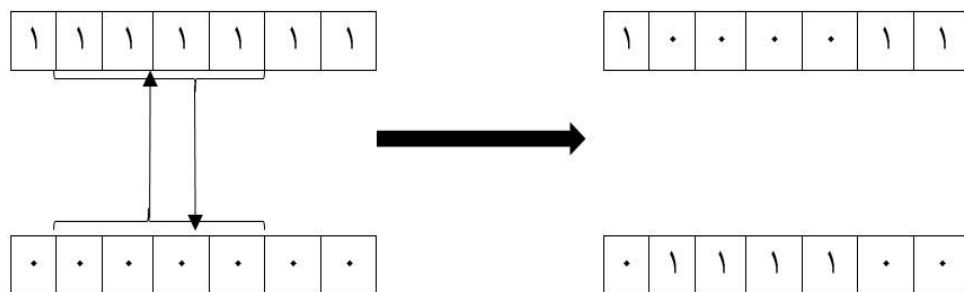
عملگر تولید مجدد: هر کروموزوم دارای یک خروجی به ازای تابع هدف می‌باشد. در حل مسائل با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد زیادی از کروموزومها وجود دارد که به عنوان جمعیت اولیه شناخته می‌شوند. با توجه به تئوری الگوریتم ژنتیک که براساس بقای موجودات قوی‌تر است، این عملگر در این الگوریتم گنجانده شده است. در واقع در این عملگر آن دسته از کروموزوم‌هایی که قوی‌تر هستند از شانس بیشتری برای انتخاب شدن برخوردار هستند و آن دسته از کروموزوم‌هایی که ضعیف هستند به مرور حذف خواهند شد. در این قسمت کروموزوم‌هایی از جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند.

عملگر تقاطع: ترکیب هر دو والد دو فرزند به وجود می‌آورد. در شکل ۲-۳ و شکل ۳-۳ دو نمونه

از این ترکیب‌ها نشان داده شده است.



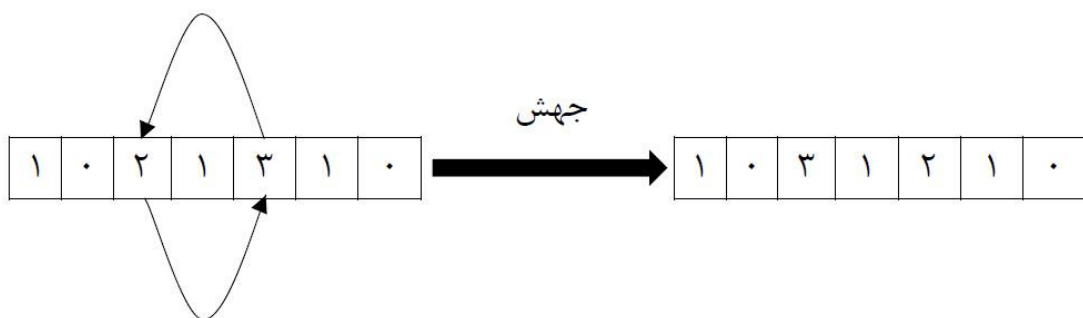
شکل ۲-۳: نمونه‌ای از عملگر تقاطع



شکل ۳-۳. تقاطع دو نقطه‌ای

عملگر جهش: تعداد کمی از کروموزوم‌ها به صورت تصادف انتخاب می‌شوند و بر روی این کروموزوم‌ها

عملیات جهش صورت می‌گیرد.

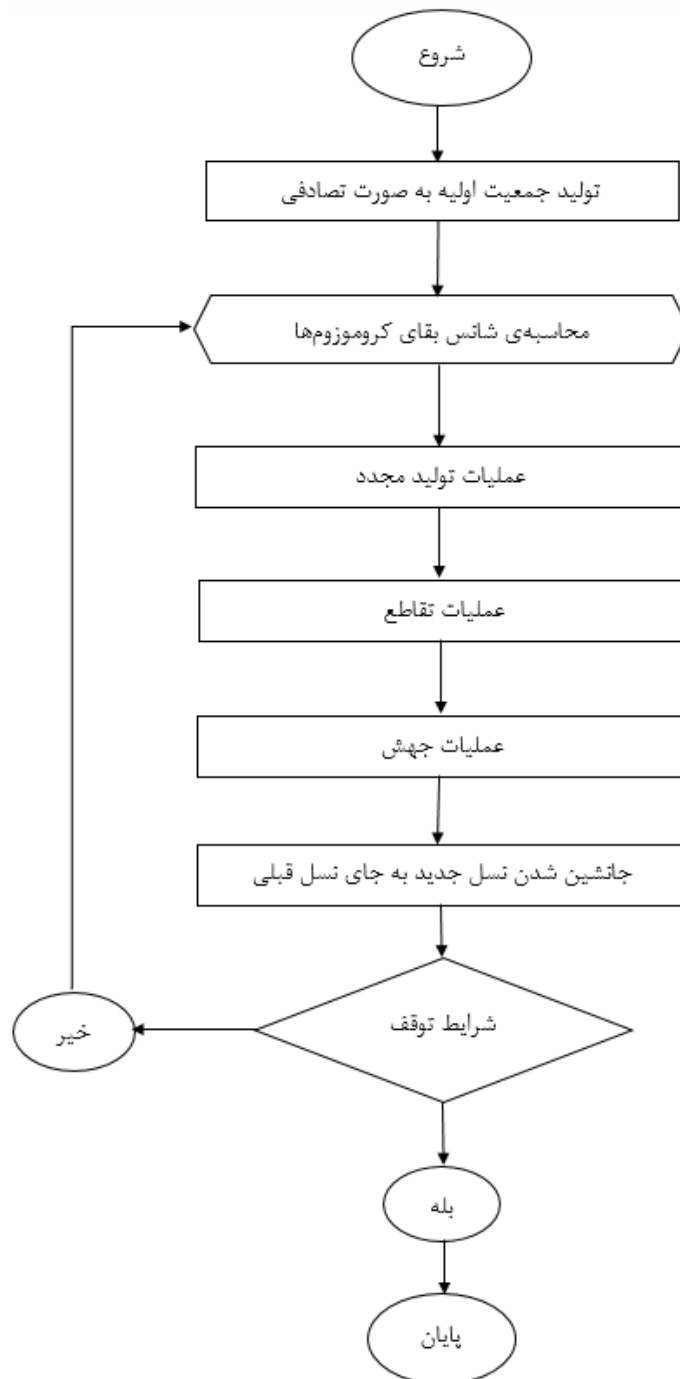


شکل ۴-۳. جهش

در طی این عملیات تعدادی زن‌ها (درایه‌ها) به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و جایگاه این درایه‌ها

عوض می‌شود. نمونه‌ای از این عملیات در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. معمولاً کروموزوم‌های جدید

ایجاد شده کروموزوم‌های ضعیفی می‌باشند ولی تعداد کمی از این جهش‌ها کروموزوم‌های قدرتمندی ایجاد می‌کنند فلوچارت الگوریتم ژنتیک در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۵. فلوچارت الگوریتم ژنتیک

## ۳-۲ الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتمی می‌باشد که از فرایند اجتماعی سیاسی انسان‌ها الگوبرداری کرده است. این الگوریتم مانند دیگر الگوریتم‌ها با یک جمعیت اولیه تصادفی آغاز به کار می‌کند. هر عضو از یک جمعیت، یک کشور (در الگوریتم ژنتیک کروموزوم) نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته‌ی مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر بسته به قدرت خود تعدادی کشور 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 [۴۲].

همان‌طور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم کمینه‌ساز می‌باشد یعنی کشورهای معمولی در دره‌های معمولی و کشورهای استعمارگر در دره‌هایی با عمق زیادتر قرار دارند. در طی این الگوریتم ممکن است بارها مستعمره جایگاه بهتری نسبت به استعمارگر خود پیدا کند که در نتیجه جایگاه مستعمره و استعمارگر با هم عوض می‌شود. به طور کلی مراحل الگوریتم رقابت استعماری شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- شکل‌دهی امپراطوری اولیه

۲- سیاست جذب

۳- انقلاب

۴- جایجایی مستعمره و استعمارگر

۵- رقابت استعماری

۶- سقوط امپراطوری ضعیف

که در ادامه توضیح مختصری برای هر کدام ارائه خواهد شد.

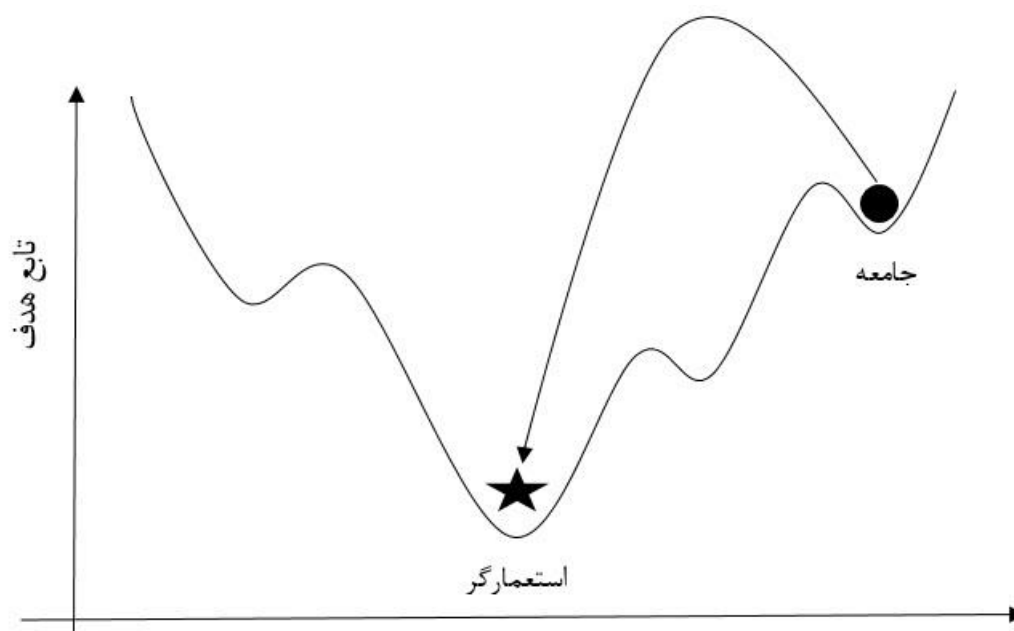


### ۳-۲-۱ شکل‌دهی امپراطوری اولیه

برای شروع الگوریتم ابتدا تعدادی کشور اولیه را به صورت تصادفی ایجاد می‌کنیم سپس تعدادی از این کشورها که از نظر مقدار تابع در شرایط بهتری قرار دارند را به عنوان امپراطورهای اولیه در نظر می‌گیریم.

### ۳-۲-۲ سیاست جذب

کشورهای استعمارگر برای افزایش نفوذ خود شروع به ساخت و سازهایی نظیر دانشگاه‌ها و مدارس کردند تا با این روش کشورهای مستعمره از نظر اجتماعی همانند کشورهای استعمارگر شوند. در شکل زیر شماتیکی از سیاست جذب نشان داده شده است.



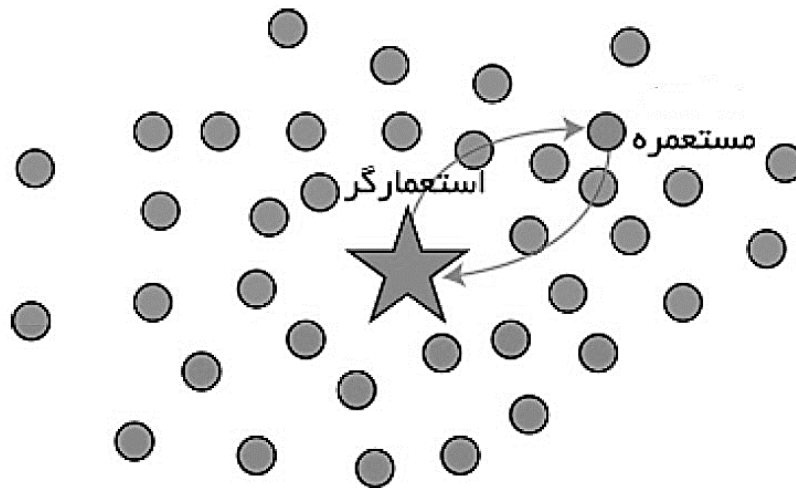
شکل ۳-۶. سیاست جذب

### ۳-۲-۳ انقلاب

بروز تغییرات ناگهانی موجب انقلاب در کشورها خواهد شد. در الگوریتم، انقلاب به جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید می‌گویند.

### ۳-۲-۴ جابجایی مستعمره و استعمارگر

همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است در اجرای الگوریتم ممکن است بعضی مستعمرات جایگاه بهتری از استعمارگر کسب کنند که در این صورت جایگاه مستعمره و استعمارگر تغییر می‌کند.



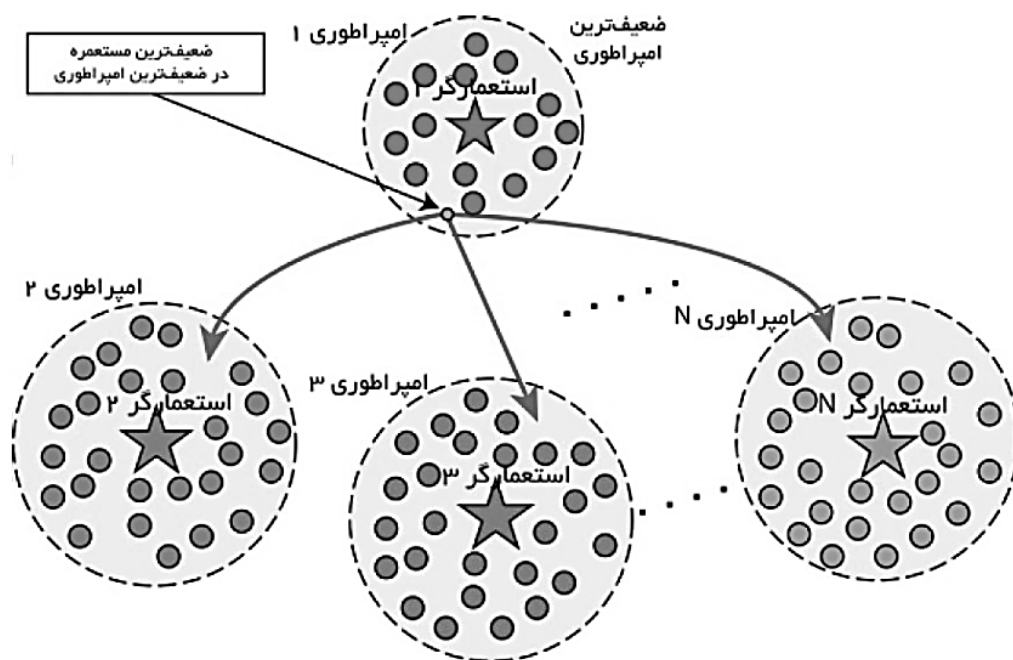
شکل ۳-۷. جابجایی مستعمره و استعمارگر [۴۲]

### ۳-۲-۵ رقابت استعماری

در این الگوریتم قدرت امپراطوری برابر است با قدرت استعمارگر و درصدی از قدرت کل مستعمرات آن امپراطوری. امپراطوری که قدرت کمتری داشته باشد مستعمره‌ی خود را از دست خواهد داد و امپراطوری که قدرت بیشتری داشته باشد شانس بیشتری برای جذب آن مستعمره خواهد داشت. قدرت هر امپراطوری طبق معادله محاسبه می‌شود [۴۲].

$$T.C_n = Cost(Impir_n) + \zeta.Cost(Clonies) \quad (۱-۳)$$

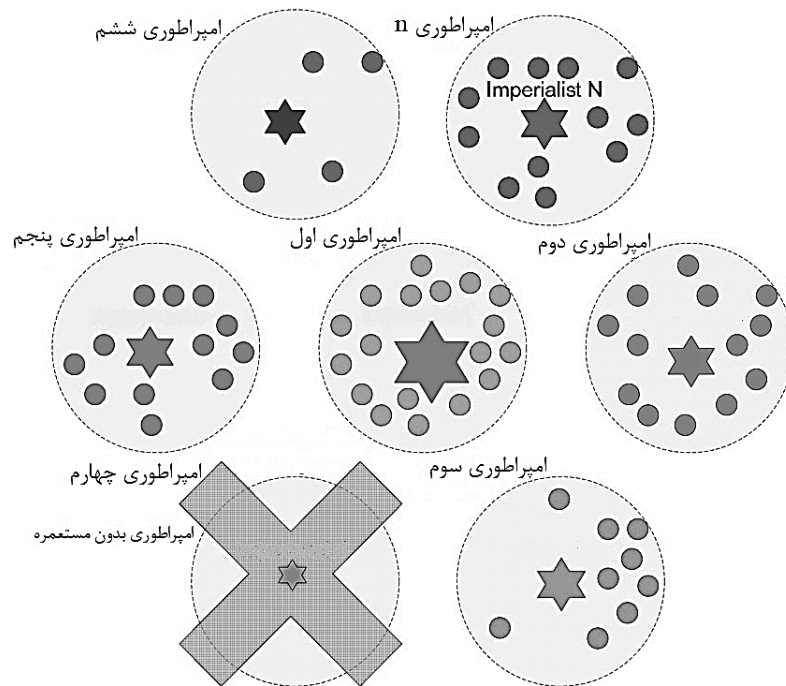
که در آن  $T.C_n$  قدرت امپراطوری  $n$ ام،  $\zeta$  عددی مثبت و کوچک و  $Cost(Clonies)$  قدرت مستعمرات امپراطوری می‌باشد.



شکل ۳-۸. رقابت استعماری [۴۲]

### ۳-۲-۶ سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در اجرای الگوریتم هر امپراطوری که مستعمره‌ای نداشته باشد حذف خواهد شد و کشور استعمارگر به عنوان مستعمره به امپراطوری دیگری خواهد رسید. در نهایت یک امپراطوری باقی خواهد ماند و تمام امپراطوری‌های دیگر از بین خواهند رفت.

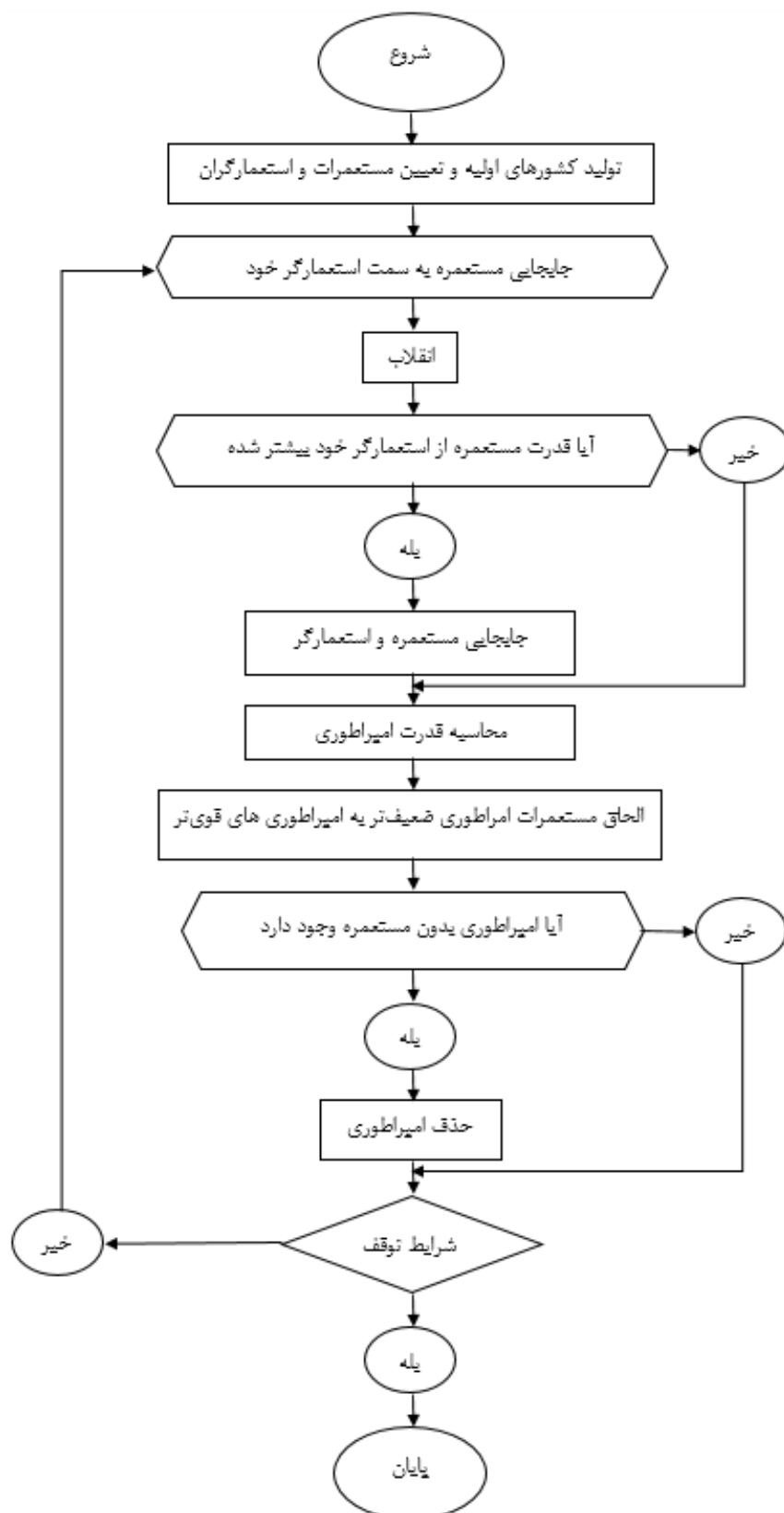


شکل ۳-۹. حذف امپراطوری‌های ضعیف [۴۲]

### ۳-۲-۷ همگرایی

این الگوریتم تا برآورده شدن شرط همگرایی یا اتمام تعداد تکرار ادامه پیدا خواهد کرد. در روند حل مسائل با این روش به مرور همه‌ی امپراطوری‌ها سقوط خواهد کرد و تنها یک امپراطوری باقی خواهد ماند. در این دنیای جدید هیچ تفاوتی میان استعمارگر و مستعمرات از نظر تابع هزینه وجود ندارد در نتیجه هیچ جابجایی بین آن‌ها رخ نخواهد داد.

در شکل ۳-۱۰ فلوچارت این الگوریتم نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری [۴۲]

### ۳-۳ نحوه بهینه سازی مکانیزم

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در این پژوهش از دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و رقابت استعماری برای سنتز بهینه‌ی مکانیزم‌های نرم استفاده شده است. همچنین ساختار اولیه‌ی مکانیزم به صورت المان‌های تشکیل شده از تیر در نظر گرفته شده است. فضای طراحی هر مکانیزم در ابتدا باید کاملاً مشخص باشد، یعنی حداکثر تعداد تیرها، نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها و همچنین شرایط مرزی باید به طور کامل از قبل معلوم شده باشد. سپس جمعیت اولیه تشکیل داده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد هر عضو از جمعیت در روش الگوریتم ژنتیک، کروموزوم و در روش رقابت استعماری، کشور نامیده می‌شود.

متغیرهای موجود در این پژوهش شامل موارد زیر می‌شود.

- وجود تیر یا عدم وجود تیر
- نوع تیر ( صاف یا منحنی )
- ضخامت تیرها
- شعاع تیرهای منحنی

انواع تیر منحنی در شکل ۳-۱۱ نشا داده شده است.



الف) تیر پایین منحنی



ب) تیر بالا منحنی

شکل ۳-۱۱. انواع تیر منحنی

در این قسمت برای تعیین کشورها یا کروموزوم‌ها به ترتیب زیر عمل خواهد شد.

برای هر نوع متغیر یک عدد در نظر گرفته می‌شود.

۱- عدم وجود تیر: عدد صفر

۲- وجود تیر خمیده: عدد یک (انحنای به سمت بالا) و عدد دو (انحنای به سمت پایین)

۳- وجود تیر صاف: عدد سه

با این چهار عدد یک رشته از اعداد صفر تا سه تولید می‌شود که تعداد این اعداد برابر با تعداد

المان‌های مکانیزم نرم می‌باشد. در نهایت با تولید تصادفی مجموعه‌ای از این رشته‌ها مجموعه‌ی اولیه

تولید می‌شود. در این پژوهش به بررسی تابع هدف مزیت مکانیکی و مزیت هندسی در مکانیزم‌های نرم

پرداخته می‌شود.





## فصل ۴ : نتایج

فرایند بهینه‌سازی که در فصل قبل تشریح شده، در این فصل بر روی سه مثال مختلف اعمال می‌شود. ساختار اولیه این مکانیزم‌ها و یا توابع هدف مورد استفاده در این مثال‌ها با هم متفاوت خواهند بود. در جدول ۱-۴ نوع متغیرها برای هر مثال نشان داده شده است. همچنین نوع مکانیزم و تابع هدف در نظر گرفته شده برای هر مثال در جدول ۲-۴ نشان داده شده است. شکل ۱-۴ دامنه‌ی اولیه‌ی طراحی برای مثال یک و شکل ۲-۴ دامنه‌ی اولیه‌ی طراحی را برای مثال‌های دوم و سوم نشان می‌دهند.

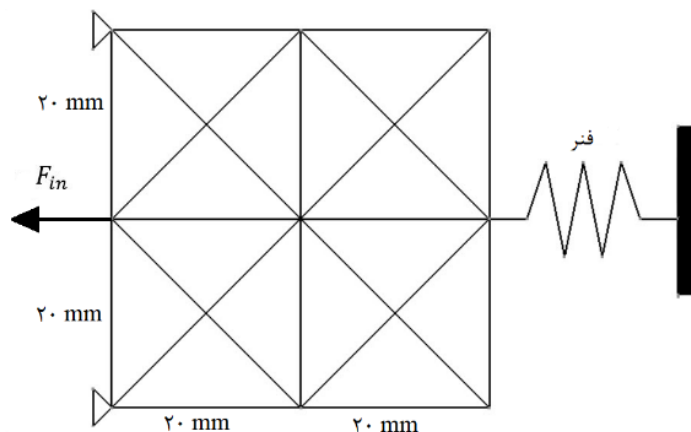
جدول ۱-۴. متغیرهای در نظر گرفته شده در هر مسئله

حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	سری مثال	متغیرها
✓	✓	✓		وجود یا عدم وجود تیر
✓	✓	✓		تیر صاف
✓	✓	×		تیر خمیده
✓	×	×		ضخامت داخل صفحه
✓	×	×		ضخامت خارج از صفحه

جدول ۲-۴. تابع هدف مورد نظر در هر مسئله

مزیت هندسی	مزیت مکانیکی	تابع هدف	مثال
×	✓		مکانیزم معکوس کننده نیرو
✓	×		مکانیزم تقویت کننده جابجایی
×	✓		مکانیزم تقویت کننده نیرو

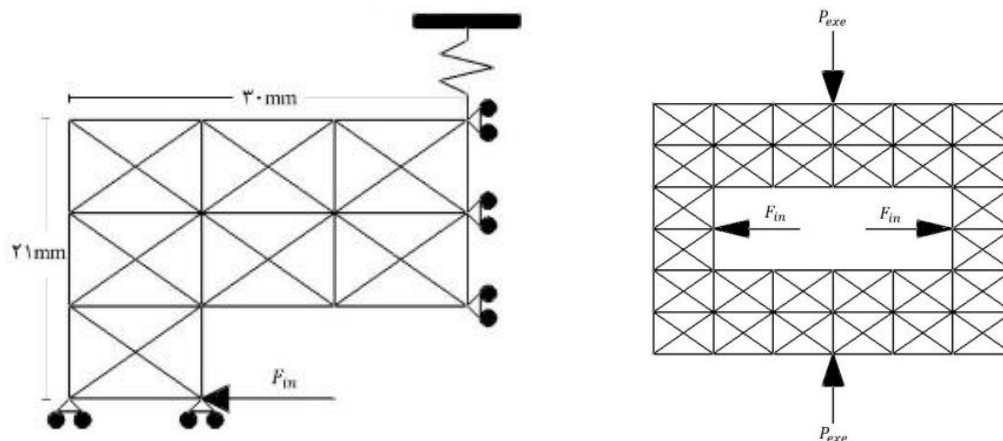
دامنه‌ی اولیه‌ی برای سنتز مکانیزم معکوس‌کننده نیرو (مثال اول) در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱. دامنه‌ی اولیه برای طراحی مکانیزم معکوس‌کننده نیرو

همان‌طور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است جابجایی ورود در جهت افقی و منفی می‌باشد و جابجایی خروجی در نقطه اتصال به فنر، افقی و مثبت می‌باشد. همچنین برای این که ورودی و خروجی در جهت عمودی انحرافی نداشته باشد نیز برای نصفه‌ی بالا عملیات بهینه‌سازی انجام می‌شود و برای نصفه‌ی پایین، قسمت بالا متقارن خواهد شد.

دامنه‌ی اولیه‌ی برای سنتز مکانیزم تقویت‌کننده جابجایی و نیرو (مثال دوم و سوم) یکسان می‌باشد و در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. همچنین مشخصات این دو مثال در جدول ۴-۸، جدول ۴-۱۴ و جدول ۴-۲۳ آمده است.



الف) دامنه‌ی کلی طراحی

ب) یک چهارم دامنه طراحی

شکل ۴-۲. دامنه‌ی اولیه برای طراحی مکانیزم تقویت‌کننده نیرو و جابجایی

با توجه به این مسئله که جابجایی‌ها در ورودی و خروجی باید به ترتیب در راستای محور افقی و محور عمودی باشند و انحرافی نداشته باشند، برای سنتز این مکانیزم فقط یک چهارم دامنه‌ی کلی در نظر گرفته شده است.

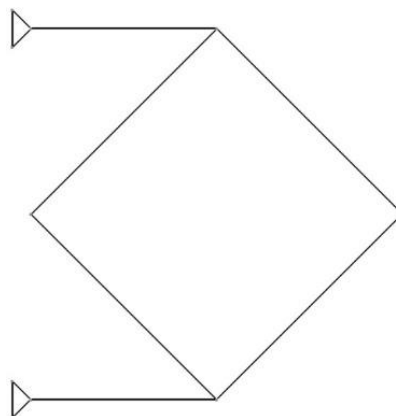
## ۴-۱ بهینه‌سازی مثال‌های مختلف در حالت اول

### ۴-۱-۱ مکانیزم معکوس‌کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. مکانیزم بهینه به دست آمده در این مسئله با هر دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری یکی بوده است که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: مشخصات مسئله اول در حالت اول

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۲ GPa	نیروی ورودی	۱ N
ضخامت خارج صفحه	۱ mm	تعداد المان‌ها	۲۸
ضخامت داخل صفحه	۰/۶۵ mm	سفتی فنر	۱۰۰۰ N/m



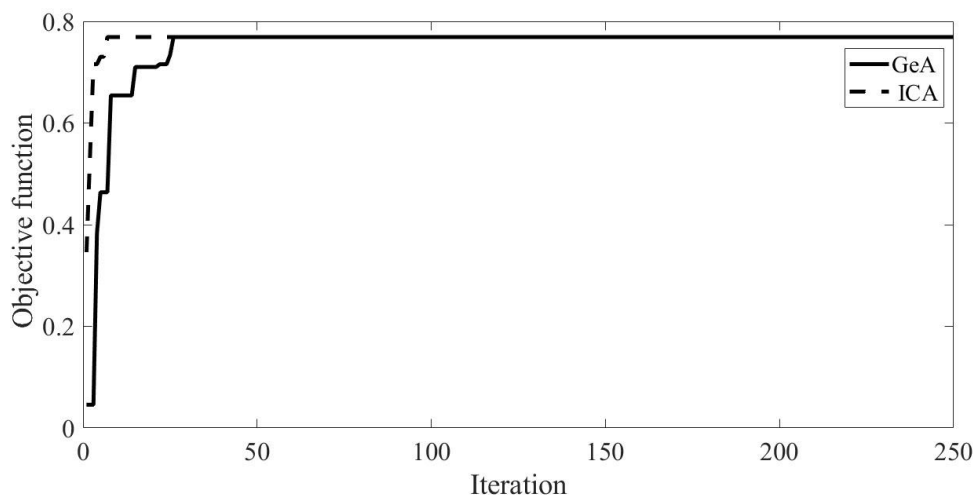
شکل ۳-۴: مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۴ نشان داده شده است. نمودار تابع هدف بر اساس تعداد تکرار نیز در شکل ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

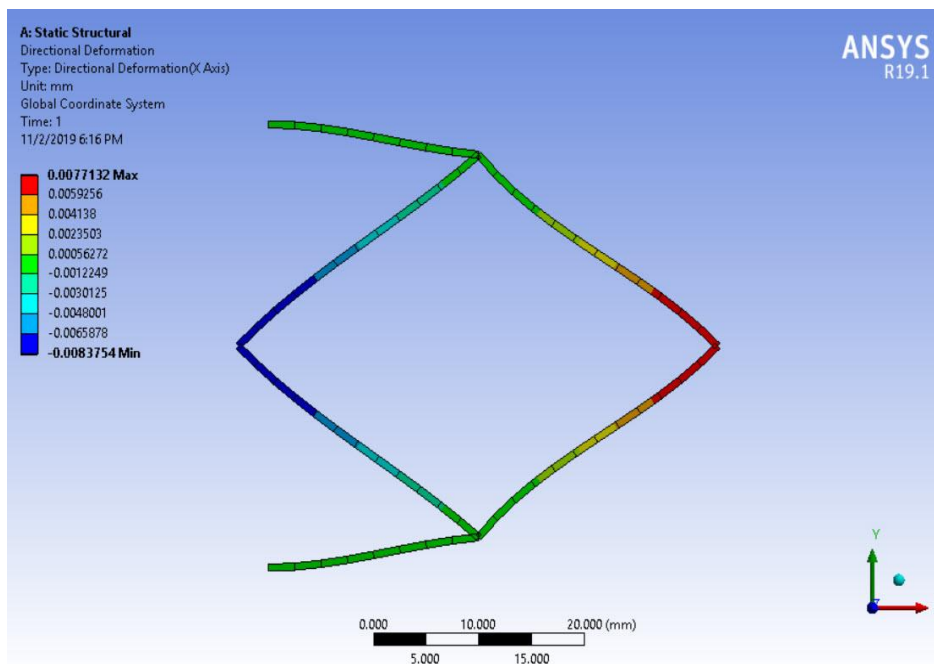
الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۷	۰/۷۶۹	۰/۶۴	٪۲۰/۱۵
ژنتیک	۲۶	۰/۷۶۹	۰/۶۴	٪۲۰/۱۵

همان طور که در جدول ۴-۴ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده در این قسمت حدود ۲۰ درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۴-۴: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

همان طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است هر دو الگوریتم به یک جواب یکسان رسیده اند در حالی که الگوریتم رقابت استعماری در تعداد تکرار کمتری به جواب بهینه دست پیدا کرده است. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۷ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۲۶ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۵ و نتایج مقدار جابجایی به دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۵ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۵: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس

جدول ۴-۵: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده نیرو

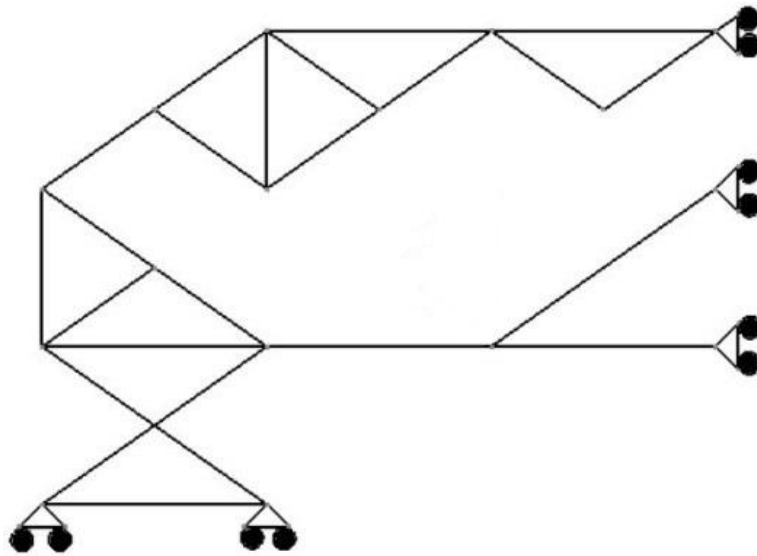
$U_{out}/U_{in}$	$U_{out} (mm)$	$U_{in} (mm)$	روش
۰/۴۷۳	۰/۷۶۹	-۰/۸۳۵	مدل ارائه شده
۰/۴۷۹	۰/۷۷۱	-۰/۸۳۷	انسیس

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس حدود ۲ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان‌دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد.

قابل ذکر است بیشینه تنش که به این مکانیزم وارد می‌شود ۶/۸ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم برابر ۴۱ مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۴-۱-۲ مکانیزم تقویت کننده‌ی جابجایی

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۸ نشان داده شده است. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در این مسئله با هر دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



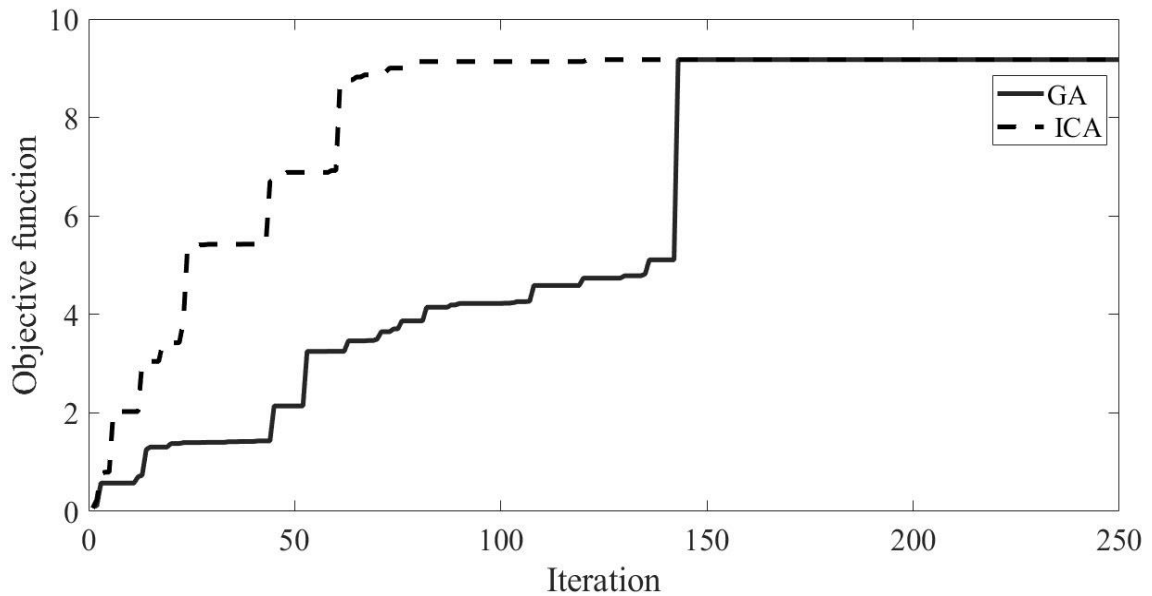
شکل ۴-۶: مکانیزم به دست آمده از بهینه سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۶ نشان داده شده است. نمودار تابع هدف بر اساس تعداد تکرار نیز در شکل ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۶: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت هندسی	مزیت هندسی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۱۲۱	۹/۱	-	٪۳۰
ژنتیک	۱۴۳	۹/۱	۷	٪۳۰

همان طور که در جدول ۴-۶ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده در این قسمت حدود ۳۰ درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.

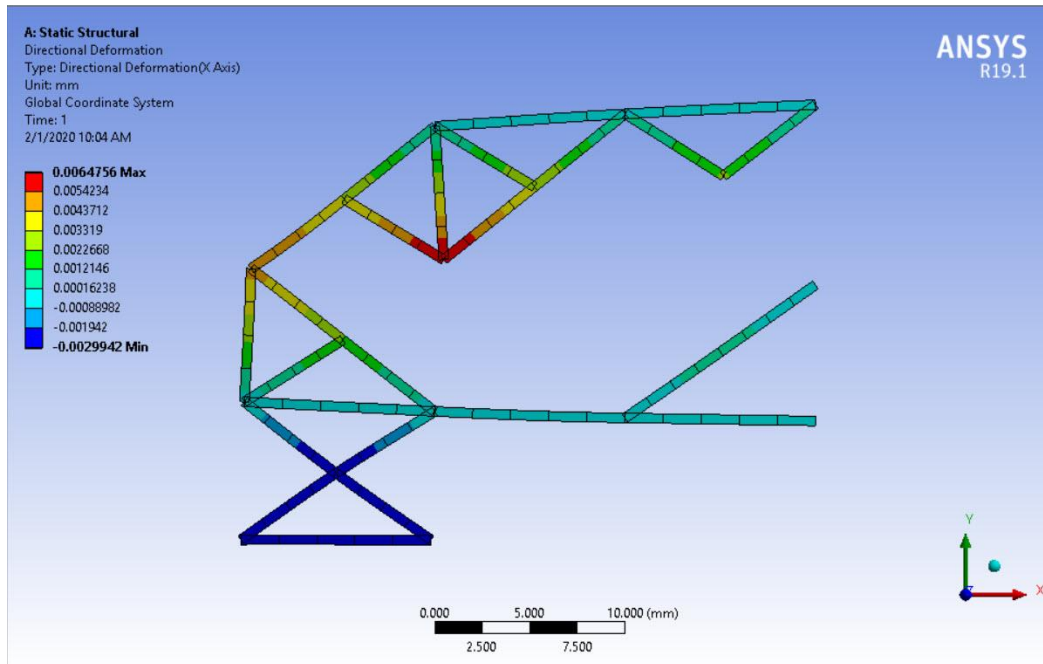


شکل ۷-۴: تابع هدف (مزیت هندسی) بر حسب تکرار

همان‌طور که در شکل ۷-۴ 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. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۱۲۱ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۱۴۳ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به‌دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۸-۴ و شکل ۹-۴ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به‌دست آمده از کدنویسی در جدول ۷-۴ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.

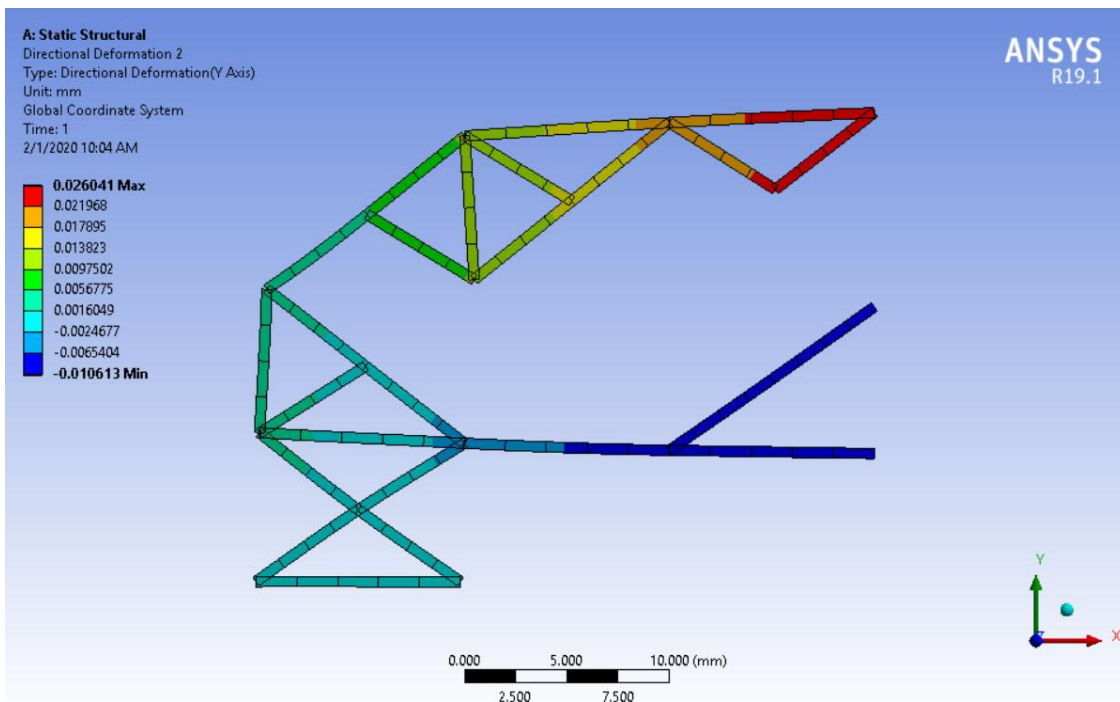


در شکل ۸-۴ جابجایی در راستای محور x نشان داده شده.



شکل ۸-۴: جابجایی در راستای محور x

در شکل ۹-۴ جابجایی در راستای محور y نشان داده شده است.



شکل ۹-۴: جابجایی در راستای y

جدول ۴-۷: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی

روش	$U_{in}$ (mm)	$U_{out}$ (mm)	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۰/۰۲۸۵	۰/۰۲۶۲	۹/۱
انسیس	-۰/۰۲۹۹	۰/۰۲۶۰۲	۸/۷

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس ۴/۶ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد.

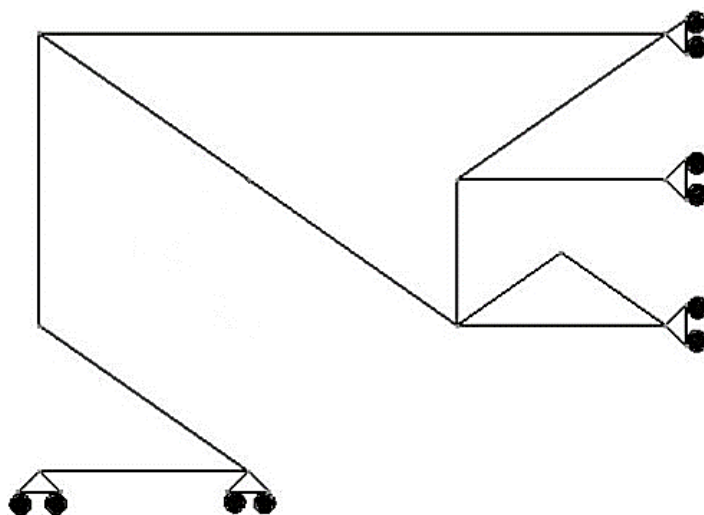
همچنین قابل ذکر است که بیشینه تنشی که به مکانیزم وارد می‌شود برابر ۹ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۴-۱-۳ مکانیزم تقویت کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۸ تعیین شده است. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در این مسئله با هر دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸: مشخصات مسئله دوم در حالت اول

پارامتر	مقدار	مقدار	مقدار
مدول الاستیسیته	۱۰۵ GPa	نیروی ورودی	۱ N
ضخامت خارج صفحه	۲ mm	تعداد المان	۴۸
ضخامت داخل صفحه	۰/۵ mm	سفتی فنر	۱۰۰۰ N/m



شکل ۴-۱۰: مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی

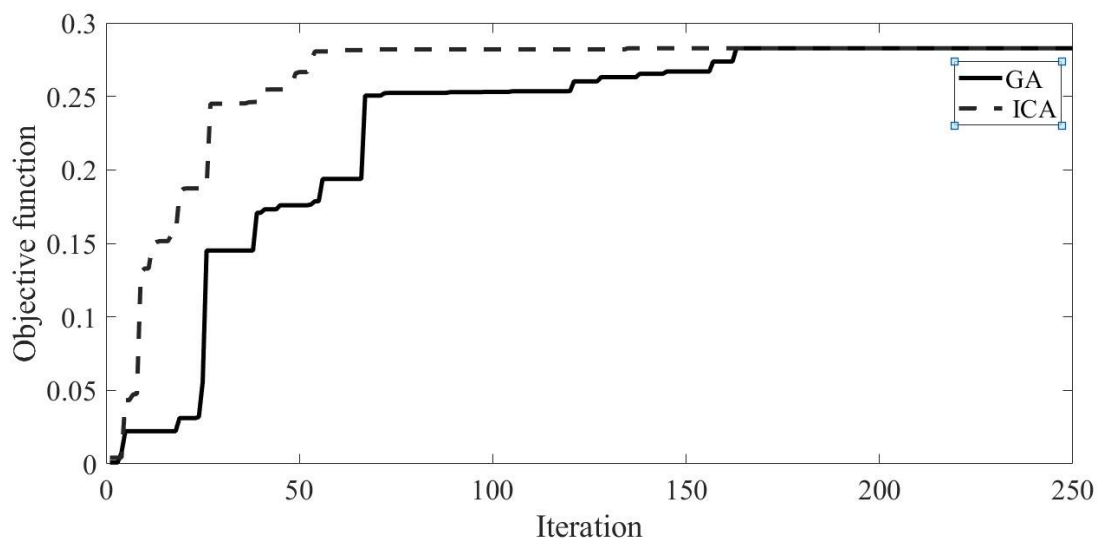
همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۹ نشان داده شده است.

جدول ۴-۹: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۱۳۵	۰/۲۸	-	٪۲۰/۱۵
ژنتیک	۱۶۳	۰/۲۸	۰/۲۲	٪۲۰/۱۵

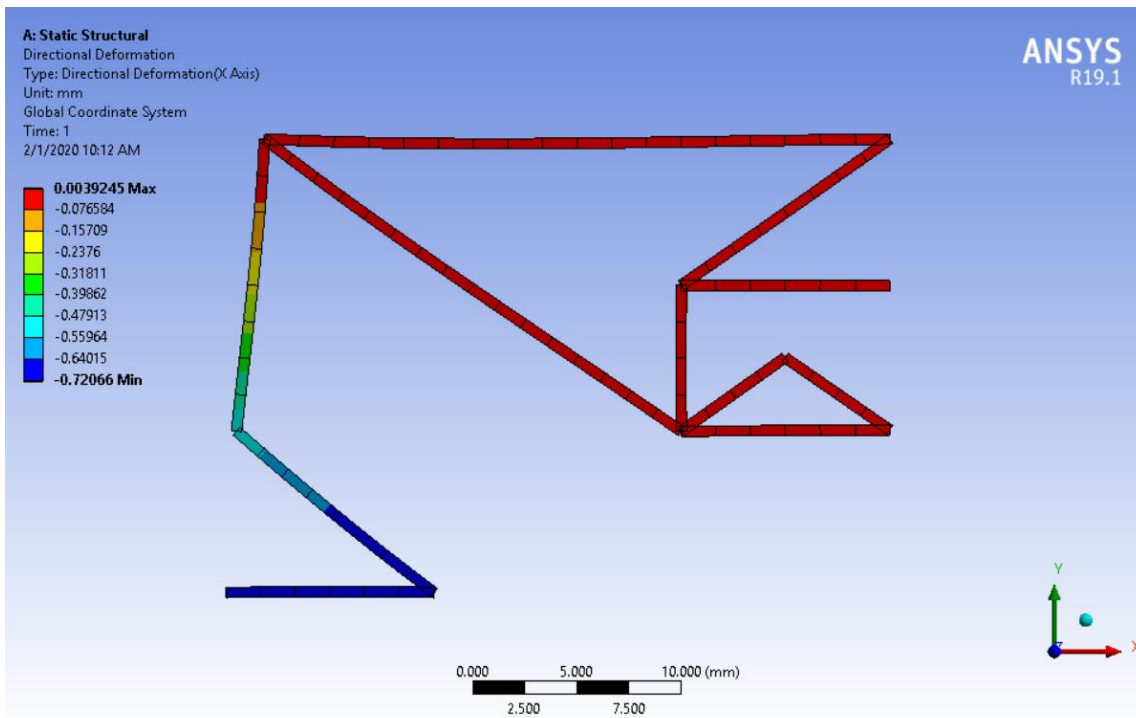
همان‌طور که در جدول ۴-۹ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده در این قسمت حدود ۲۰

درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.



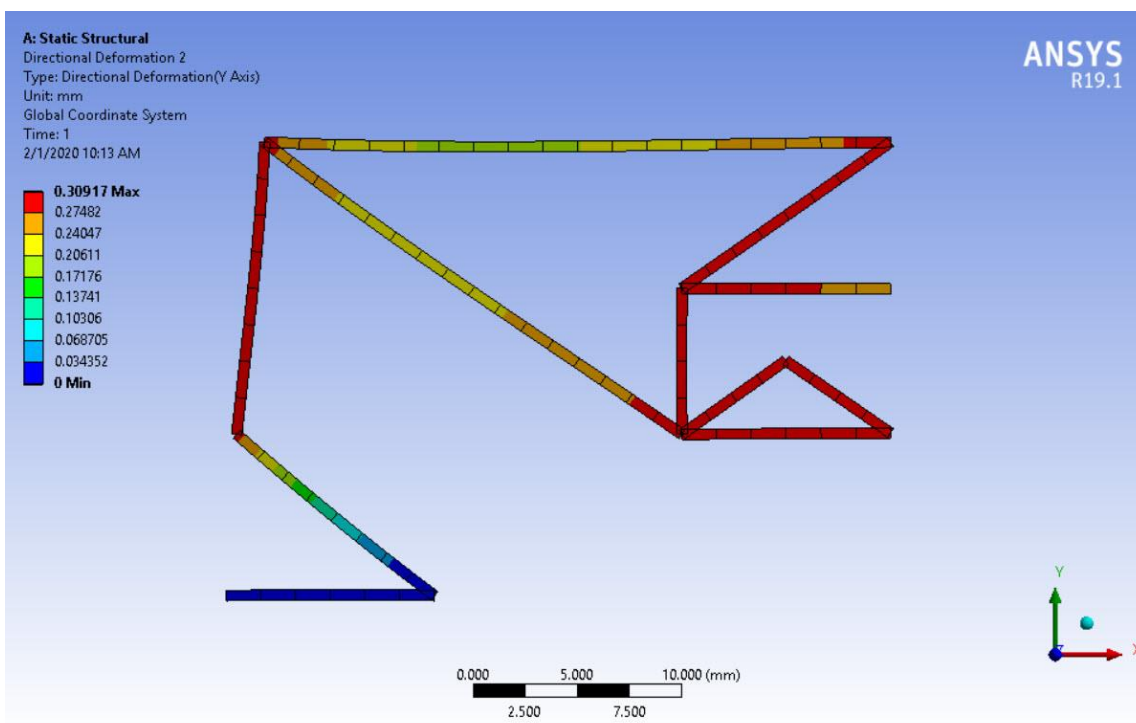
شکل ۴-۱۱: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ 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. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۱۳۵ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۱۶۳ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۱۰ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۲: جابجایی در راستای محور X

در شکل ۴-۱۳ جابجایی در راستای محور Y نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: جابجایی در راستای Y

جدول ۴-۱۰: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۰/۷۱	۰/۲۸	۱۱/۴۱
انسیس	-۰/۷۲	۰/۲۹	۱۱/۲۲

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس ۳/۴ درصد می‌باشد. بنابراین

نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد.

همچنین قابل ذکر است که بیشینه تنش‌ی که به مکانیزم وارد می‌شود برابر ۱۲۸ مگاپاسکال است

در حالی که تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.

## ۴-۲ بهینه سازی مثال‌های مختلف در حالت دوم

متغیرهای این مسئله شامل وجود یا عدم وجود تیر و نوع تیر می‌شود.

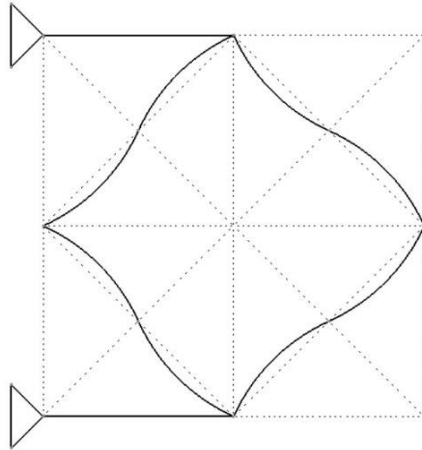
### ۴-۲-۱ مکانیزم معکوس کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در این

مسئله با هر دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱: مشخصات مسئله اول در حالت دوم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۲ GPa	شعاع تیر	۲۰ mm
ضخامت خارج صفحه	۱ mm	تعداد المان	۲۸
ضخامت داخل صفحه	۰/۶۵ mm	سفتی فنر	۱۰۰۰ N/m
نیروی ورودی	۱ N		



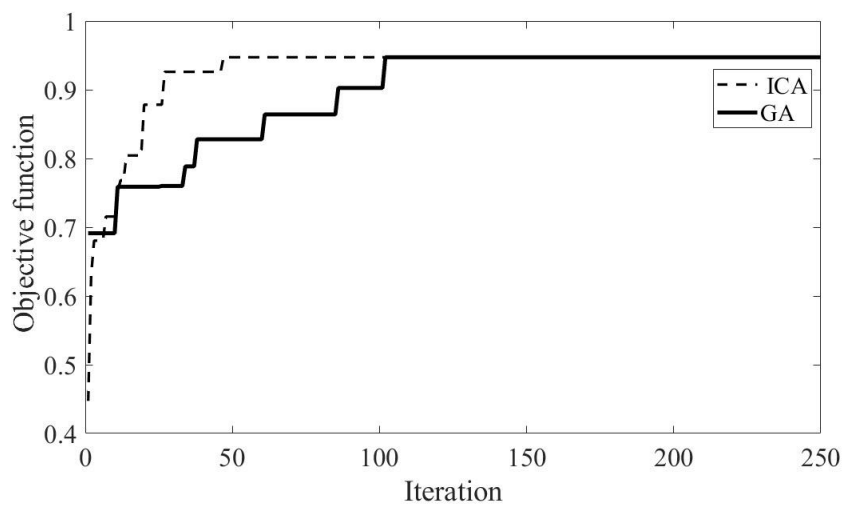
شکل ۴-۱۴: مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۲: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

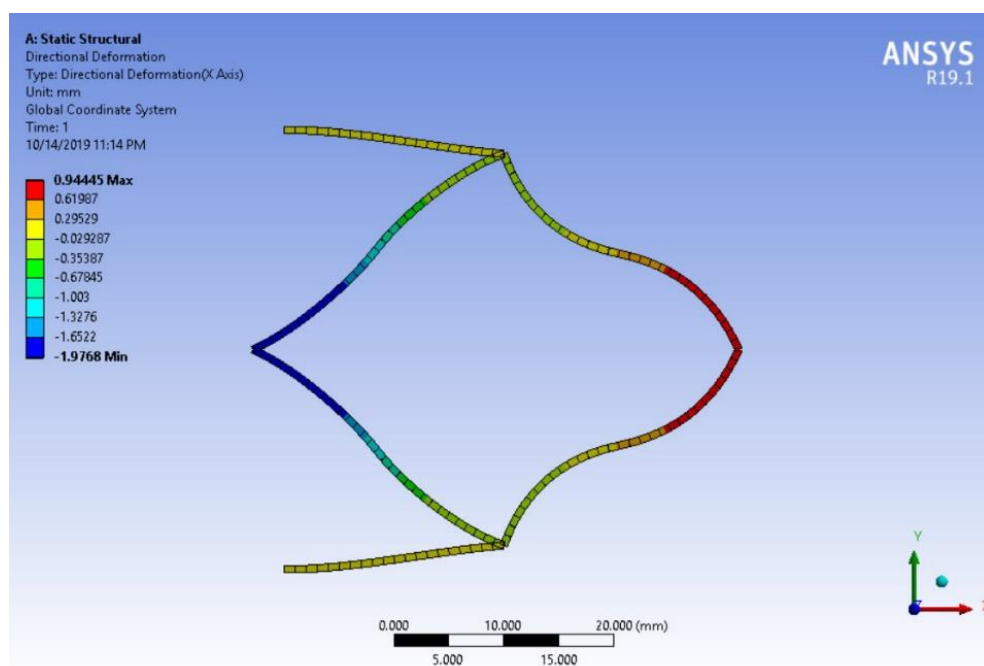
الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸) بهبود
رقابت استعماری	۲۰	۰/۹۴۷	-
ژنتیک	۸۱	۰/۹۴۷	۰/۶۴

همان‌طور که در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده در این قسمت حدود ۲۸ درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۴-۱۵: تابع هدف بر حسب تکرار

همان‌طور که در شکل ۴-۱۵ 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. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۲۰ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۸۱ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۱۳ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۶: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس

جدول ۴-۱۳: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده نیرو

$U_{out}/U_{in}$	$U_{out} (mm)$	$U_{in} (mm)$	روش
۰/۴۷۳	۰/۹۴۷	-۲	مدل ارائه شده
۰/۴۷۹	۰/۹۴۴	-۱/۹۷	انسیس

خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس ۱/۵ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان‌دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد. همچنین قابل ذکر است



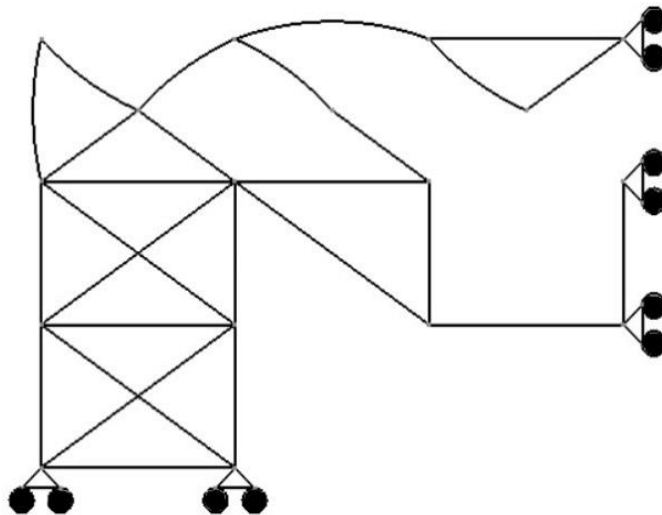
بیشینه تنش که به مکانیزم وارد می‌شود  $13/2$  مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم  $41$  مگاپاسکال می‌باشد.

### ۲-۲-۴ مکانیزم تقویت کننده‌ی جابجایی

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در این مسئله با هر دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴: مشخصات مسئله دوم در حالت دوم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	$105 \text{ GPa}$	شعاع تیر	$15 \text{ mm}$
ضخامت خارج صفحه	$1 \text{ mm}$	تعداد المان	$48$
ضخامت داخل صفحه	$0.5 \text{ mm}$	سفتی فنر	$1000 \text{ N/m}$
نیروی ورودی	$1 \text{ N}$		



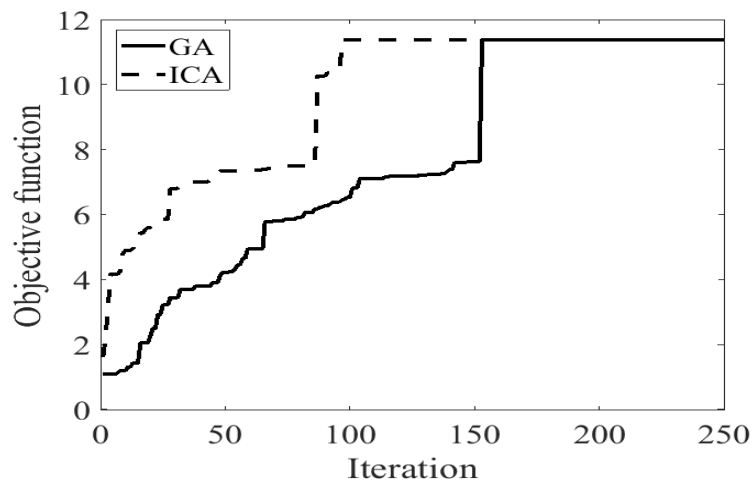
شکل ۴-۱۷: مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۵: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۹۷	۱۱/۳۸	-	٪۶۲/۵۷
ژنتیک	۱۵۳	۱۱/۳۸	۷	٪۶۲/۵۷

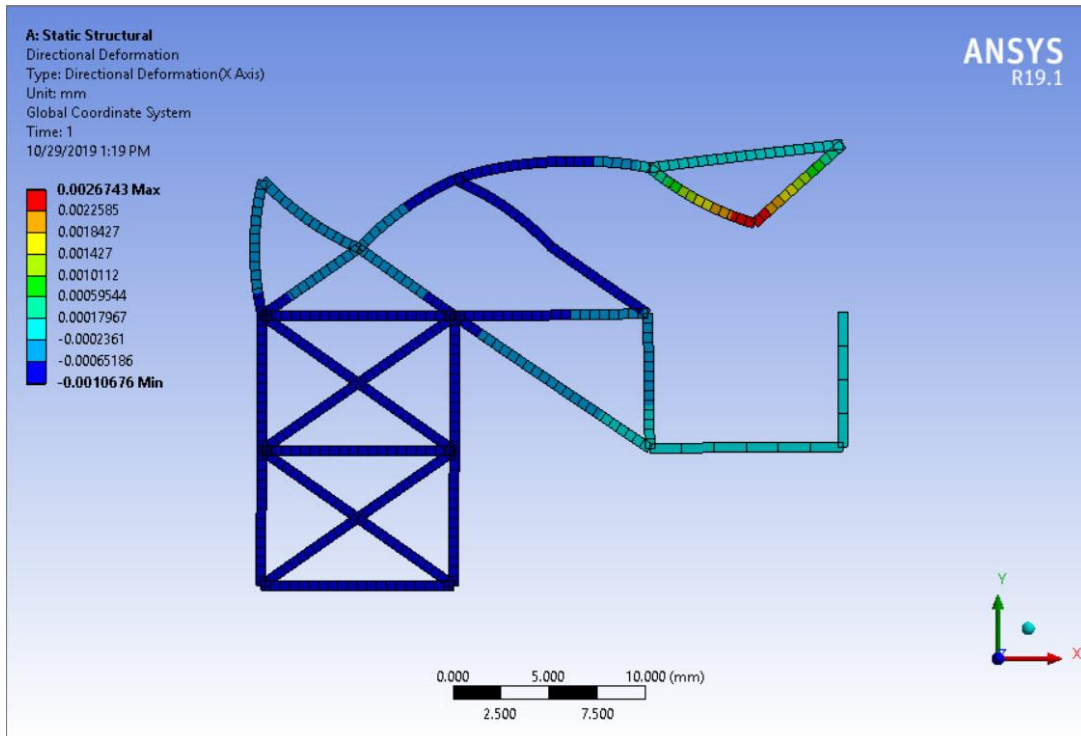
همان طور که در جدول ۴-۱۵ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده به دلیل استفاده از تیرهای خمیده حدود ۶۲ درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۴-۱۸: تابع هدف (مزیت هندسی) بر حسب تکرار

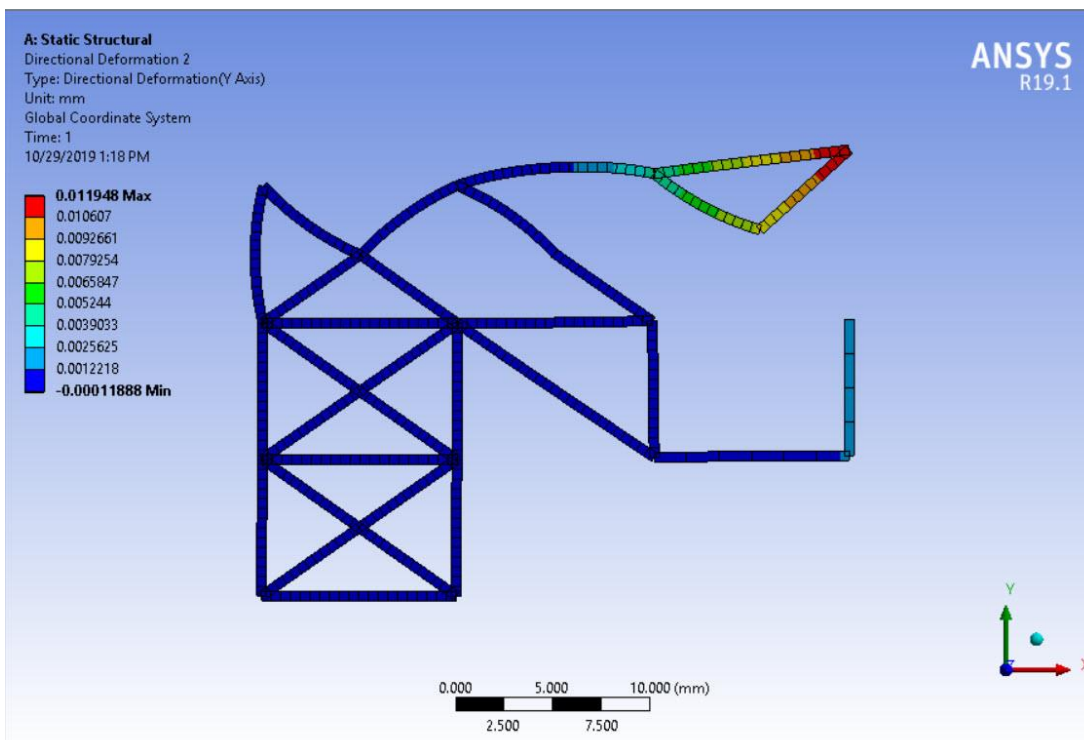
همان طور که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است هر دو الگوریتم به یک جواب یکسان رسیده‌اند در حالی که الگوریتم رقابت استعماری در تعداد تکرار کمتری به جواب بهینه دست پیدا کرده است. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۹۷ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۱۵۲ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۱۶ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل ۱۹-۴ جابجایی در راستای محور  $y$  نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۴: جابجایی در راستای محور  $x$

در شکل ۲۰-۴ جابجایی در راستای محور  $y$  نشان داده شده است.



شکل ۲۰-۴: جابجایی در راستای  $y$

جدول ۴-۱۶: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی

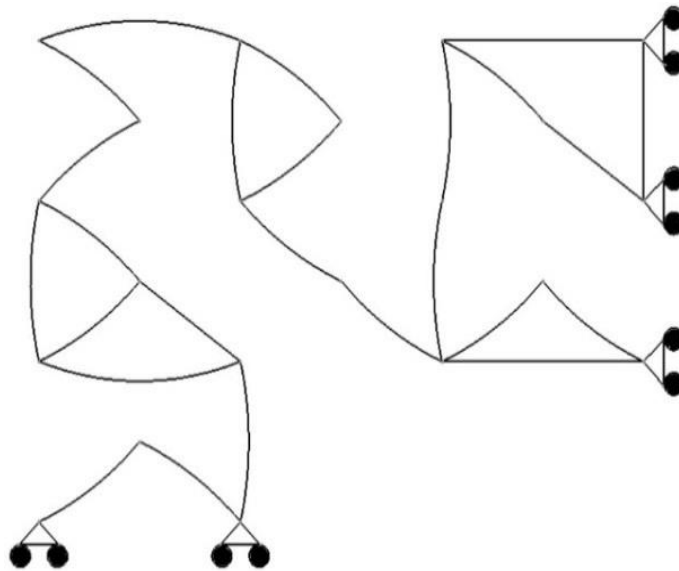
روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۰/۰۰۱۰۶	۰/۰۱۲۱	۱۱/۴۱
انسیس	-۰/۰۰۱۰۶	۰/۰۱۱۹	۱۱/۲۲

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس ۱/۶ درصد می‌باشد. بنابراین نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد.

همچنین قابل ذکر است که بیشینه تنش‌ی که به مکانیزم وارد می‌شود برابر ۴/۸ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۴-۲-۳ مکانیزم تقویت کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله همان مشخصات تعیین شده در جدول ۴-۱۴ می‌باشند. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در این مسئله با هر دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.



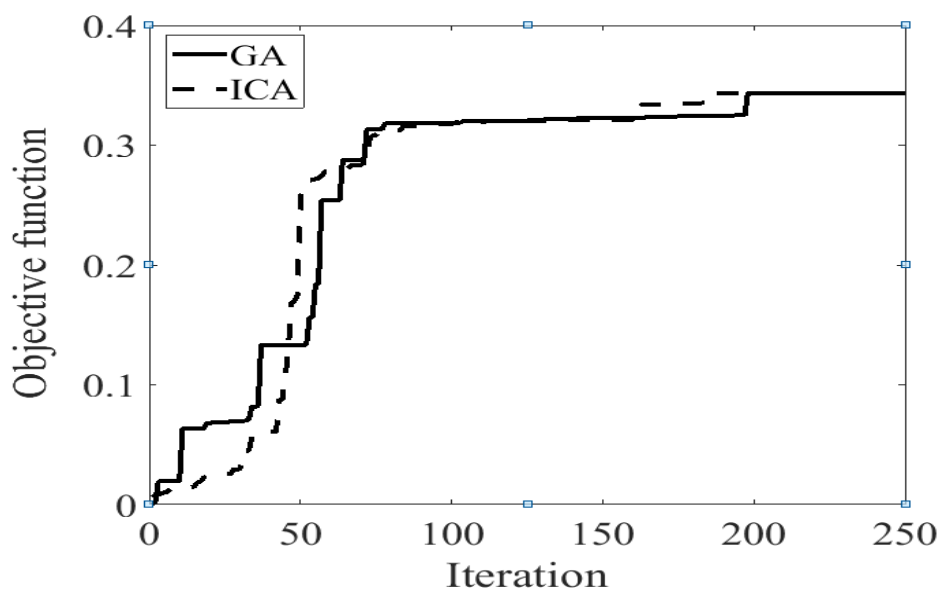
شکل ۴-۲۱: مکانیزم به دست آمده از بهینه‌سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۷: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۱۸۵	۰/۳۳۶	-	%۵۲/۷
ژنتیک	۱۹۸	۰/۳۳۶	۰/۲۲	%۵۲/۷

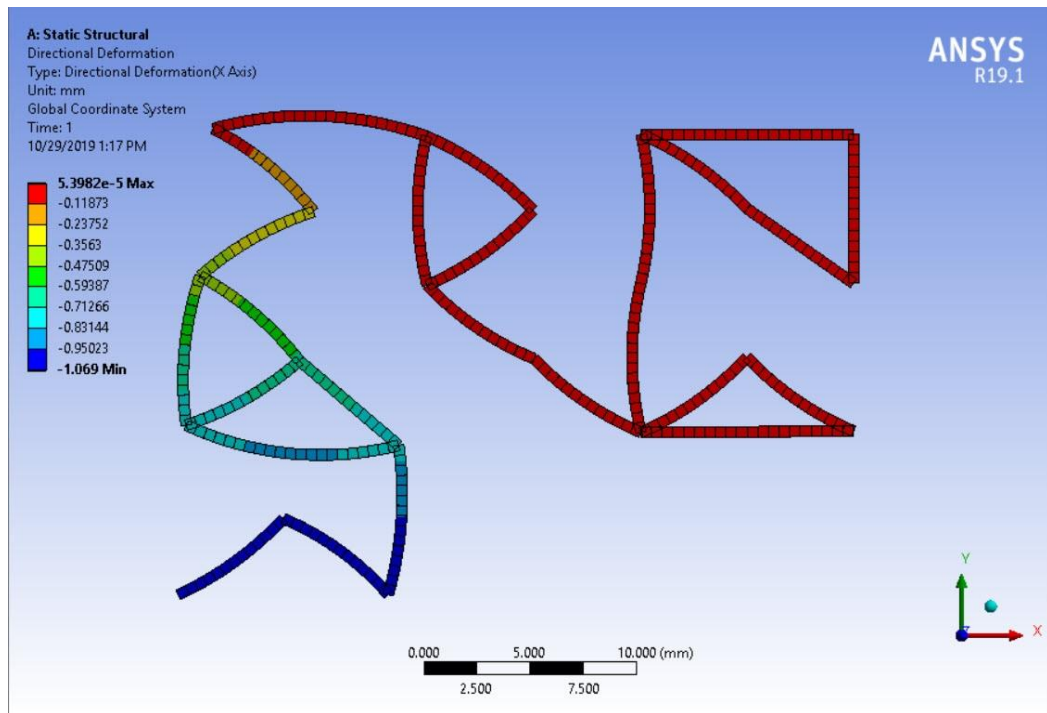
همان طور که در جدول ۴-۱۷ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده در این قسمت حدود ۵۲ درصد از مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۴-۲۲: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

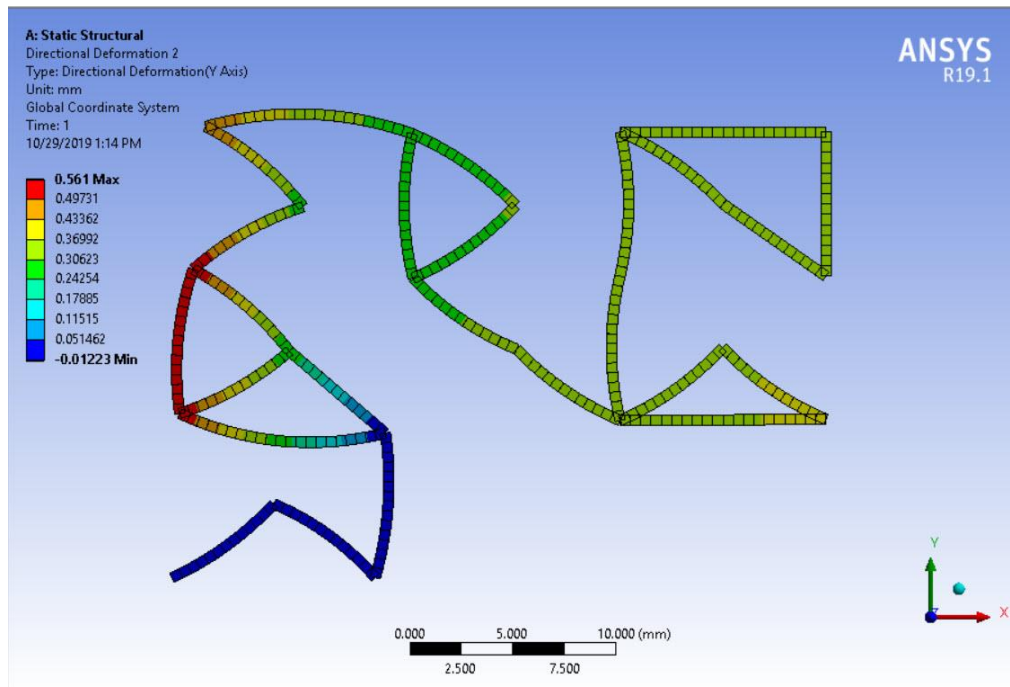
همان طور که در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است هر دو الگوریتم به یک جواب یکسان رسیده اند در حالی که الگوریتم رقابت استعماری در تعداد تکرار کمتری به جواب بهینه دست پیدا کرده است. الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۱۸۵ و الگوریتم ژنتیک در تکرار ۱۹۸ به جواب رسیده است. نتایج جابجایی به دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۱۸ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل ۲۳-۴ جابجایی در راستای محور X نشان داده شده.



شکل ۲۳-۴: جابجایی در راستای محور X

در شکل ۲۴-۴ جابجایی در راستای محور Y نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۴: جابجایی در راستای Y

جدول ۴-۱۸: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی

روش	$U_{in}$ (mm)	$U_{out}$ (mm)	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	۱/۱	۰/۳۴۳	۰/۳۱
انسیس	۱/۰۶	۰/۳۴۵	۰/۳۲

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس ۳/۷ درصد می‌باشد. بنابراین

نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس نشان دهنده‌ی تایید مدل ارائه شده می‌باشد.

همچنین قابل ذکر است که بیشینه تنشی که به مکانیزم وارد می‌شود برابر ۱۴۵ مگاپاسکال است

در حالی که تنش تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.

### ۳-۴ بهینه سازی مثال‌های مختلف در حالت سوم

متغیرهای این سری مثال شامل وجود یا عدم وجود تیر، نوع تیر، شعاع تیر منحنی و ضخامت ( داخل

و خارج صفحه) تیر می‌شود.

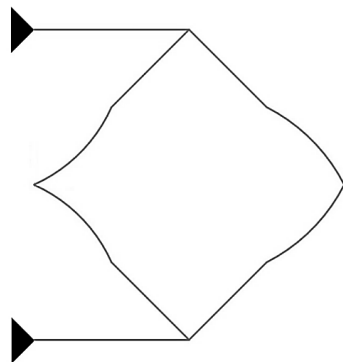
### ۱-۳-۴ مکانیزم معکوس کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۱۹ نشان داده شده است. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در شکل

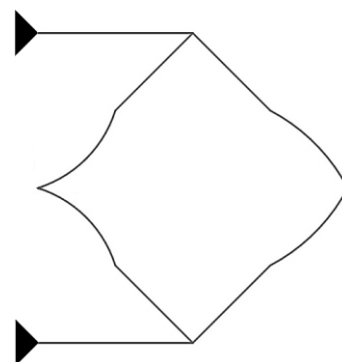
۴-۲۵ نشان داده شده است. در این مثال جواب بهینه‌ی دو الگوریتم با یکدیگر اختلاف داشت.

جدول ۴-۱۹: مشخصات مسئله اول در حالت سوم

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۲ GPa
ضخامت خارج صفحه (mm)	$0.6\text{mm} < \text{ضخامت} < 1.4\text{mm}$
ضخامت داخل صفحه (mm)	$0.4\text{mm} < \text{ضخامت} < 1\text{mm}$
نیروی ورودی	۱ N
شعاع تیر	$17\text{mm} < \text{شعاع} < 23\text{mm}$
تعداد المان	۴۸
سفتی فنر	۱۰۰۰ N/m



(ب) براساس الگوریتم ژنتیک



(الف) براساس الگوریتم رقابت استعماری

شکل ۴-۲۵: مکانیزم به دست آمده از بهینه سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۲۰ نشان داده شده است.

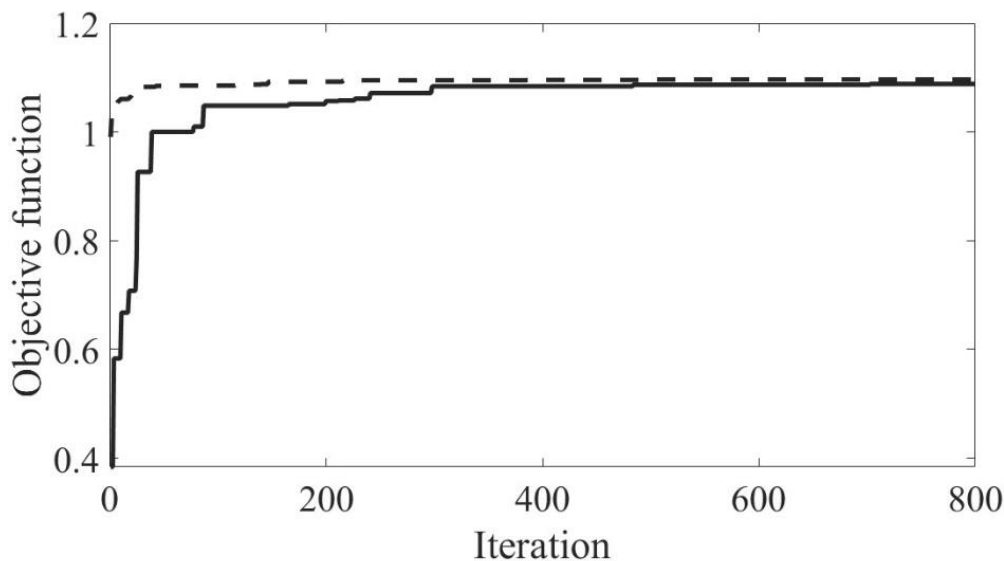
جدول ۴-۲۰: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۷۹۴	۱/۰۹۶۱	-	۲۲
ژنتیک	۷۰۳	۱/۰۸۸۴	۰/۸۹۶۸	۲۱

همان طور که در جدول ۴-۲۲ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده از الگوریتم های رقابت



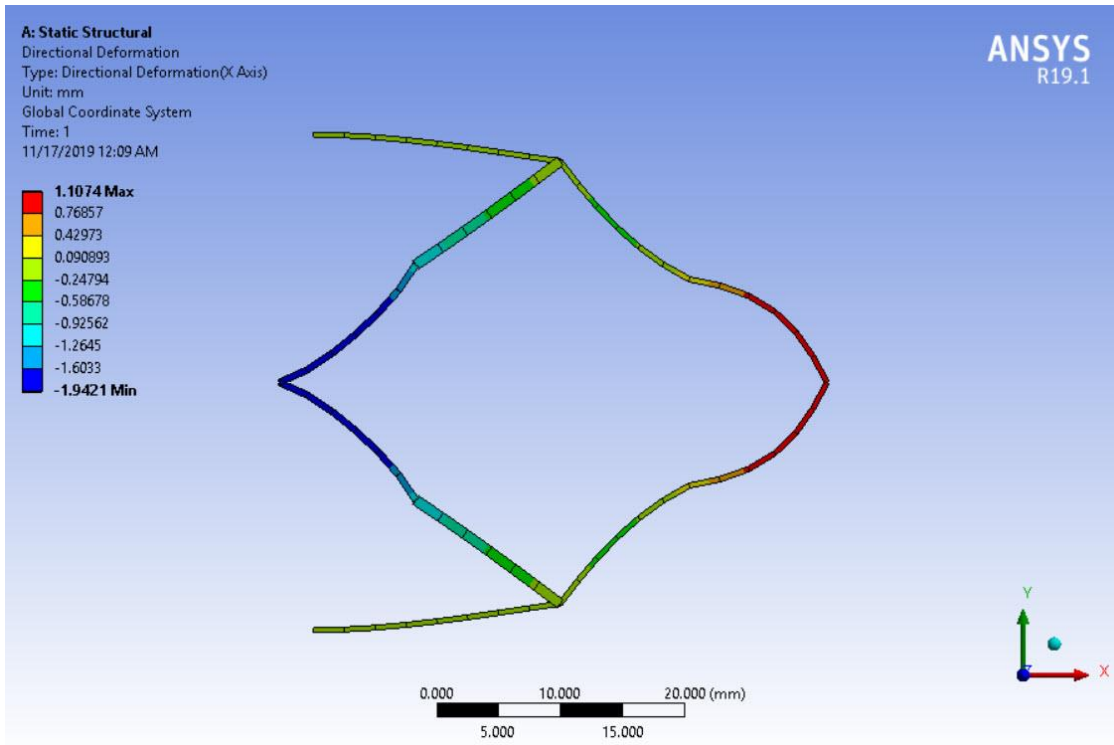
استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۲۲ و ۲۱ درصد نسبت به مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته‌اند.



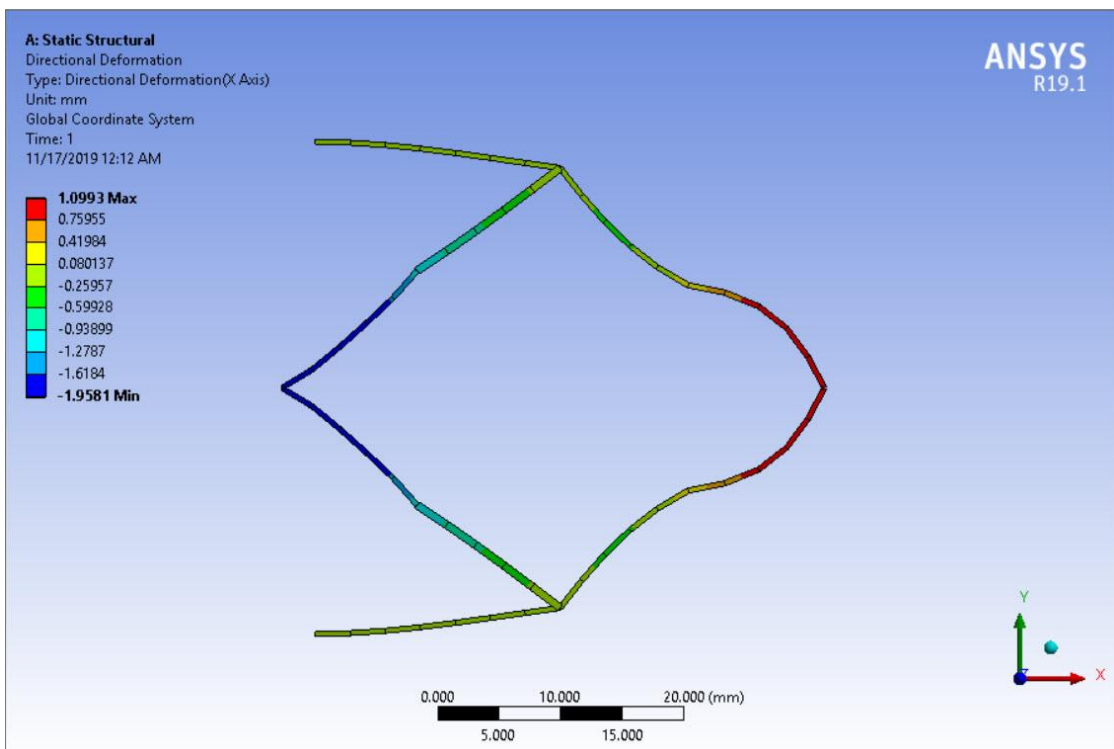
شکل ۴-۲۶: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

همان‌طور که در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است، در این مثال هر دو الگوریتم جواب متفاوتی نسبت به هم داشتند. الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب به جواب بهینه‌ی  $1/0.961$  و  $1/0.884$  رسیده‌اند.

نتایج جابجایی به‌دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ به ترتیب مربوط به الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک می‌باشند. نتایج مقدار جابجایی به‌دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۲۱ و جدول ۴-۲۲ آمده است. همچنین در این جدول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۲۷: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری)



شکل ۴-۲۸: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک)

جدول ۴-۲۱: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم رقابت استعماری ) و انسیس برای معکوس کننده ی نیرو

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۱/۹۹۷	۱/۰۹۶۱	۰/۳۱
انسیس	-۱/۹۴۲	۱/۱۰۷	۰/۳۲

جدول ۴-۲۲: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم معکوس کننده ی نیرو

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۱/۹۹۷	۱/۰۸۸۴	۰/۳۱
انسیس	-۱/۹۵۸	۱/۰۹۹	۰/۳۲

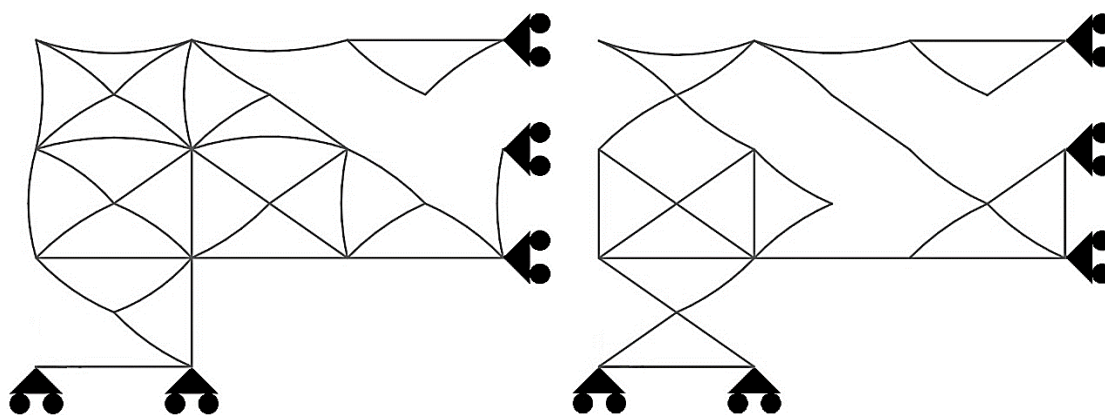
بیشینه خطای جابجایی ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس برای الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برابر ۲/۷ و ۱/۹ می باشد. بنابراین مدل ارائه شده مورد تایید می باشد. همچنین قابل ذکر است بیشینه تنش وارد شده به مکانیزم به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری به ترتیب برابر ۱۴/۶۵ و ۱۷/۳ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم برابر ۴۱ مگاپاسکال می باشد.

### ۴-۳-۲ مکانیزم تقویت کننده ی جابجایی

مشخصات این مسئله در جدول ۴-۲۳ نشان داده شده است. نتیجه ی مکانیزم به دست آمده در شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است. در این مثال جواب بهینه ی دو الگوریتم با یکدیگر اختلاف داشت.

جدول ۴-۲۳: مشخصات مسئله دوم در حالت سوم

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته	۱۰۵ GPa
ضخامت خارج صفحه (mm)	$1/5 < \text{ضخامت} < 0/5$
ضخامت داخل صفحه (mm)	$2/4 < \text{ضخامت} < 1/6$
نیروی ورودی	۱ N
شعاع تیر	$12\text{mm} < \text{شعاع} < 18\text{mm}$
تعداد المان	۲۸
سفتی فنر	۱۰۰۰ N/m



(ب) براساس الگوریتم ژنتیک

(الف) براساس الگوریتم رقابت استعماری

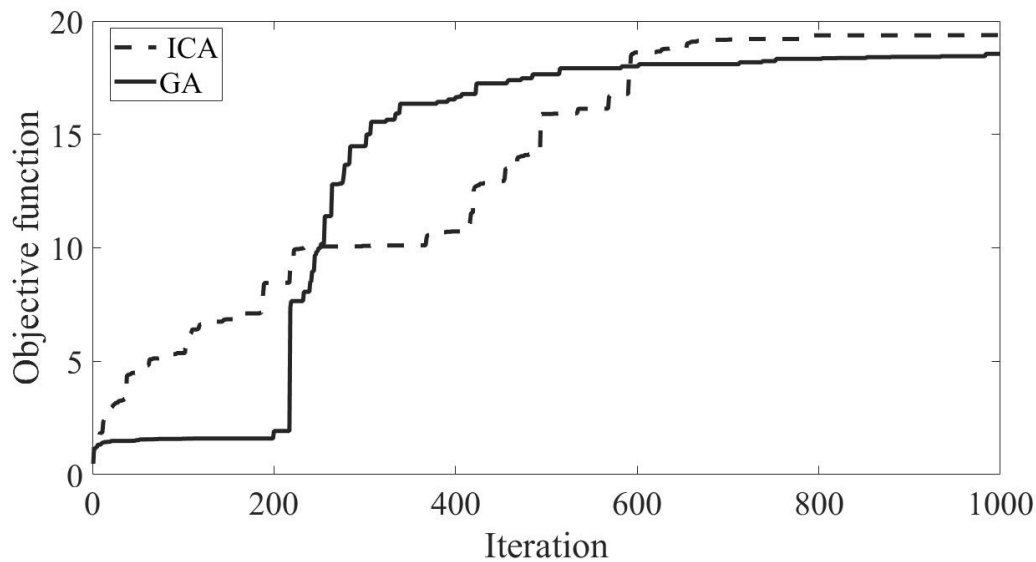
شکل ۴-۲۹: مکانیزم به دست آمده از بهینه سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۲۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۴: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۹۷۸	۱۹/۳۷۶	-	٪۳۸/۴
ژنتیک	۹۸۵	۱۸/۵۵۴	۱۴	٪۳۲/۵۲

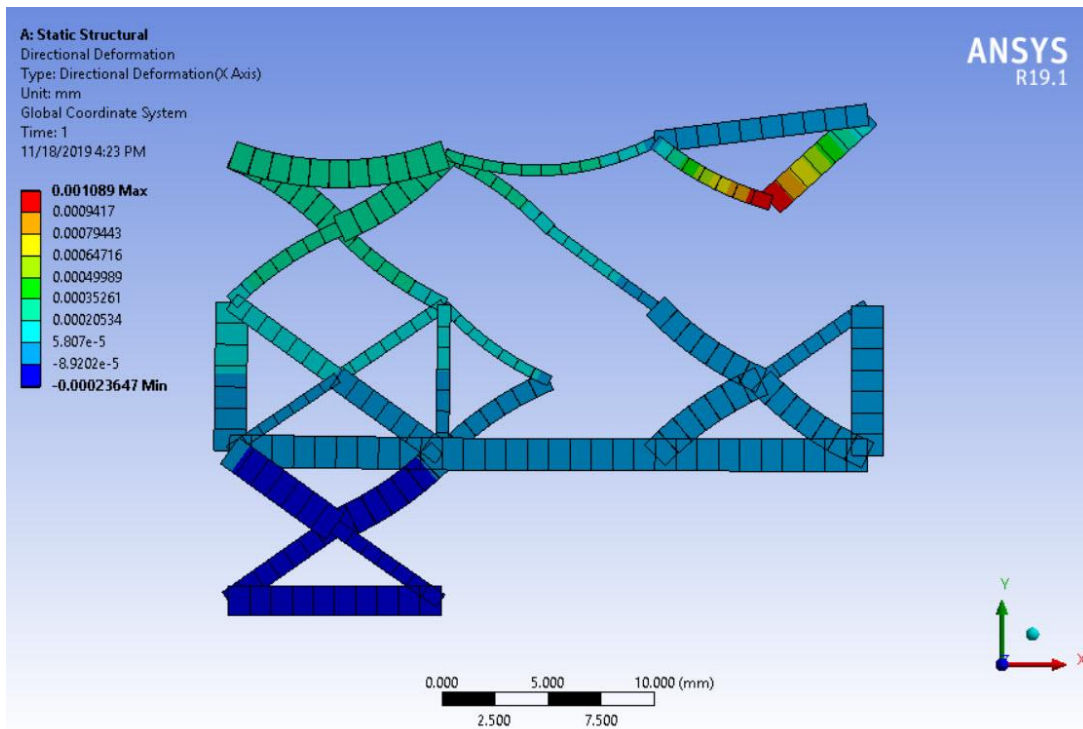
همان‌طور که در جدول ۴-۲۴ نشان داده شده است، مکانیزم به‌دست آمده از الگوریتم‌های رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۳۸ و ۳۲ درصد نسبت به مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته‌اند. نمودار تابع هدف بر اساس تعداد تکرار در شکل ۴-۳۰ آمده است.



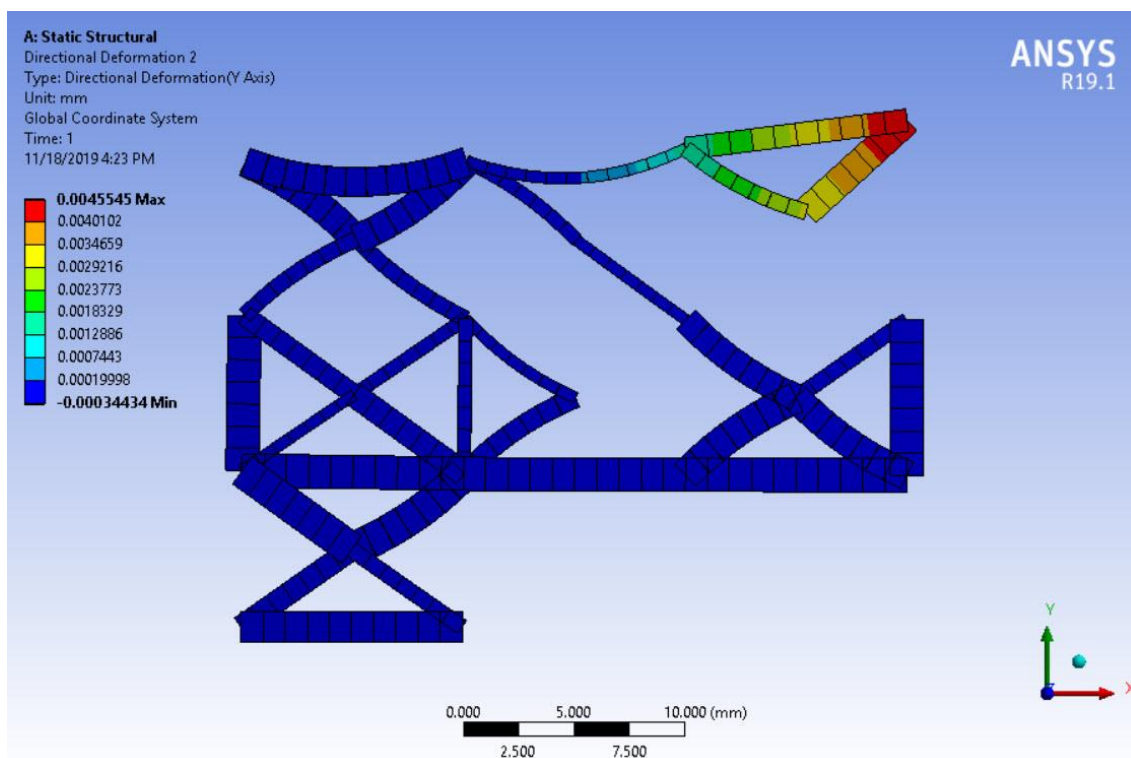
شکل ۴-۳۰: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

همان‌طور که در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است، در این مثال هر دو الگوریتم جواب متفاوتی نسبت به هم داشتند. الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب به جواب بهینه‌ی ۱۹/۳۷۶ و ۱۸/۵۵۴ رسیده‌اند.

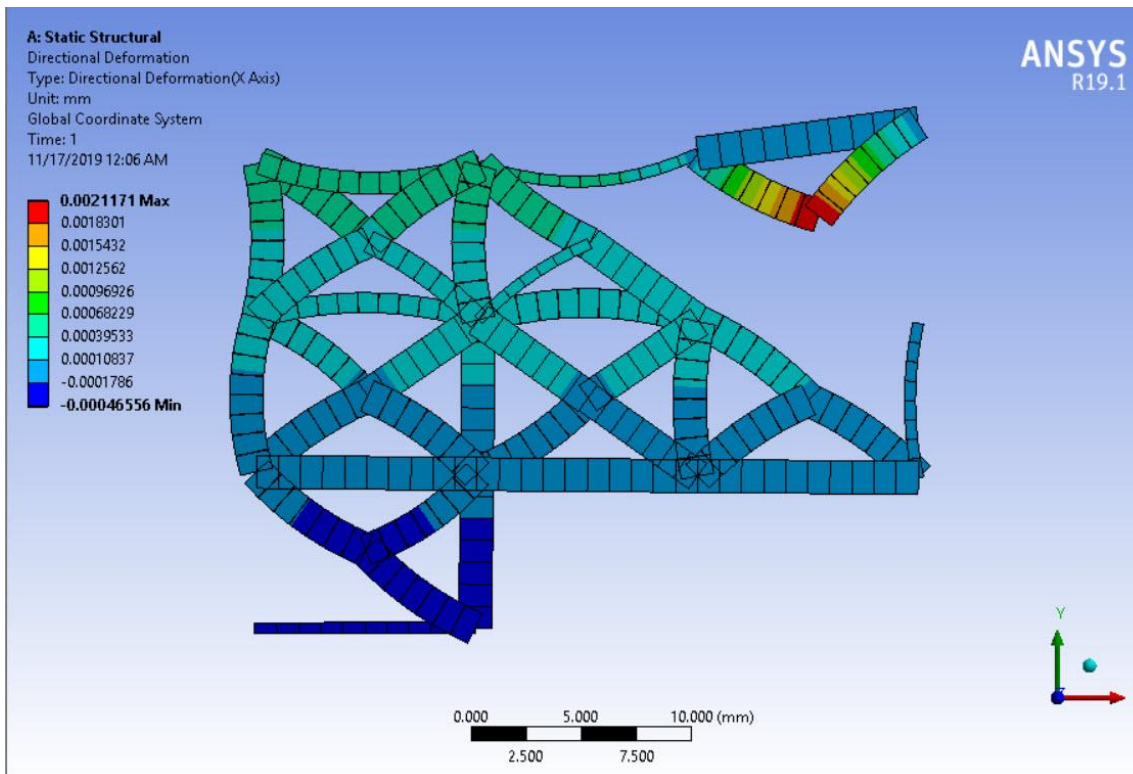
نتایج جایجایی به‌دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۳۱ تا شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است. نتایج مقدار جایجایی به‌دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۲۵ و جدول ۴-۲۶ آمده است. همچنین در این جداول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



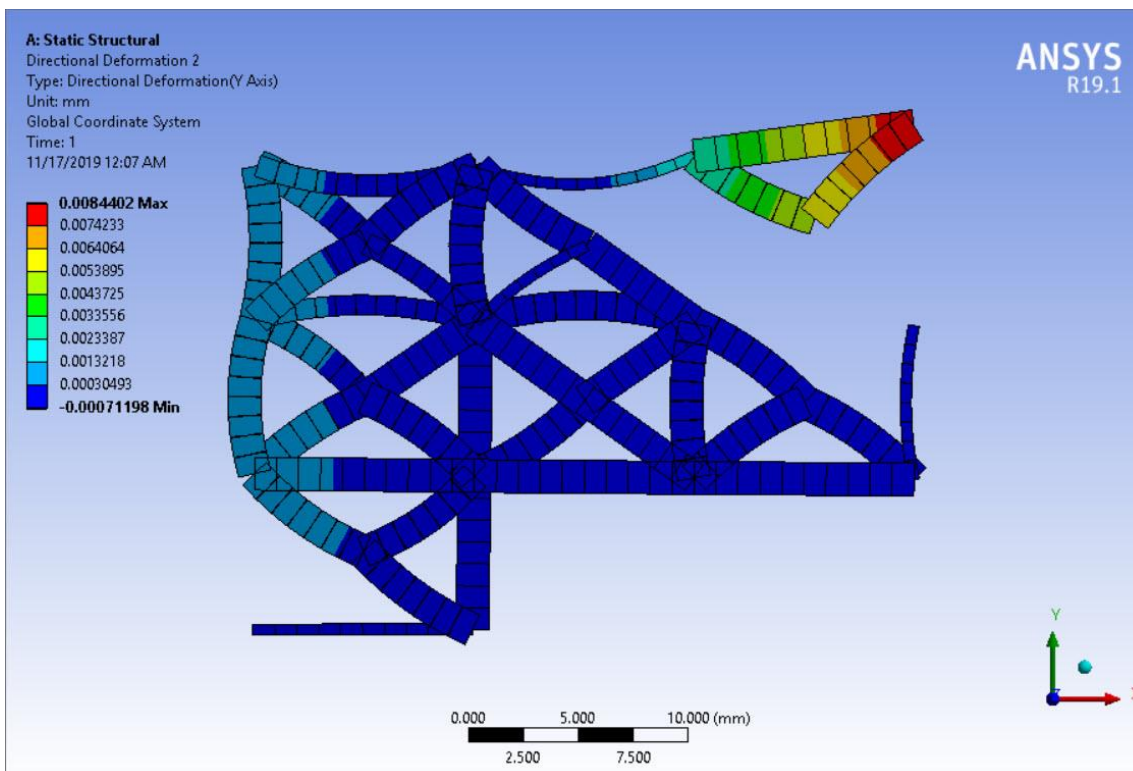
شکل ۴-۳۱: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در راستای x (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری)



شکل ۴-۳۲: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در راستای y (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری)



شکل ۴-۳۳: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک)



شکل ۴-۳۴: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک)

جدول ۴-۲۵: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( رقابت استعماری ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۰/۰۰۰۲۳۳	۰/۰۰۴۵۳	۱۹/۳۷۶
انسیس	-۰/۰۰۰۲۳۶	۰/۰۰۴۵۵	۱۹/۲

جدول ۴-۲۶: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده جابجایی

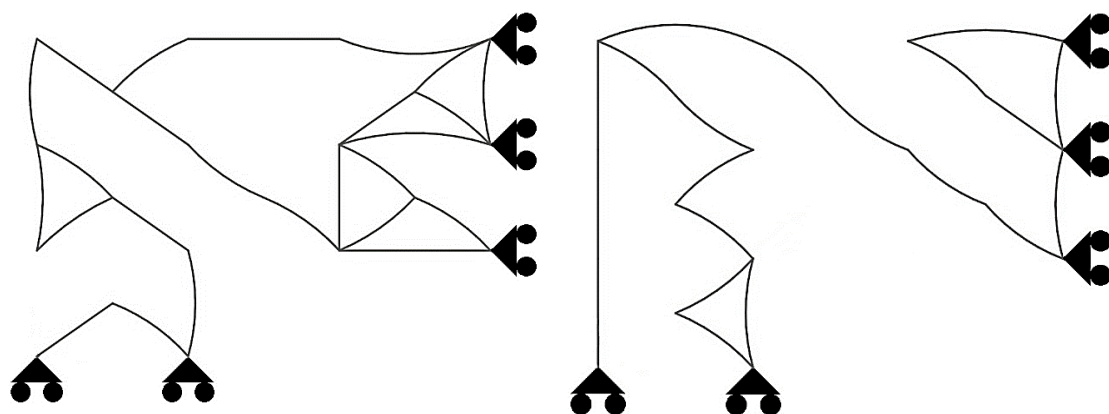
روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	-۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۸۵۴	۱۸/۵۵۴
انسیس	-۰/۰۰۰۴۶۴	۰/۰۰۸۸۴	۱۹/۰۵

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس برای الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برابر ۱/۶ و ۳/۳ می‌باشد. بنابراین مدل ارائه شده مورد تایید می‌باشد. همچنین قابل ذکر است بیشینه تنش وارد شده به مکانیزم به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری به ترتیب برابر ۱/۳ و ۲/۸ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم برابر ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.

### ۴-۳-۳ مکانیزم تقویت کننده‌ی نیرو

مشخصات این مسئله همان مشخصات تعیین شده در جدول ۴-۲۳ می‌باشد. نتیجه‌ی مکانیزم به دست آمده در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. در این مثال جواب بهینه‌ی دو الگوریتم با یکدیگر اختلاف داشت.





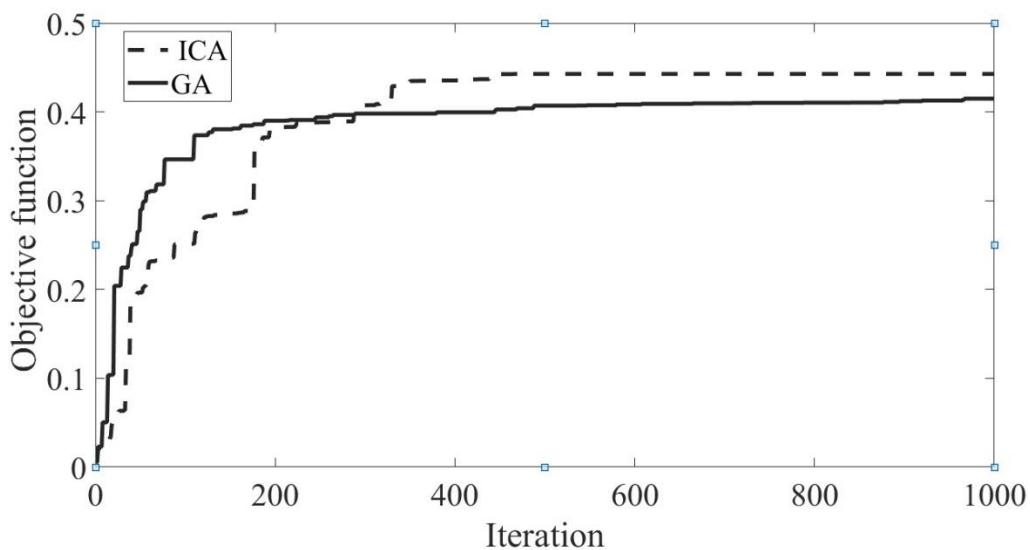
الف) براساس الگوریتم رقابت استعماری  
 ب) براساس الگوریتم ژنتیک  
 شکل ۴-۳۵: مکانیزم به دست آمده از بهینه سازی

همچنین نتایج عددی به دست آمده از اجرای این دو الگوریتم در جدول ۴-۲۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۷: بهترین نتایج به دست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

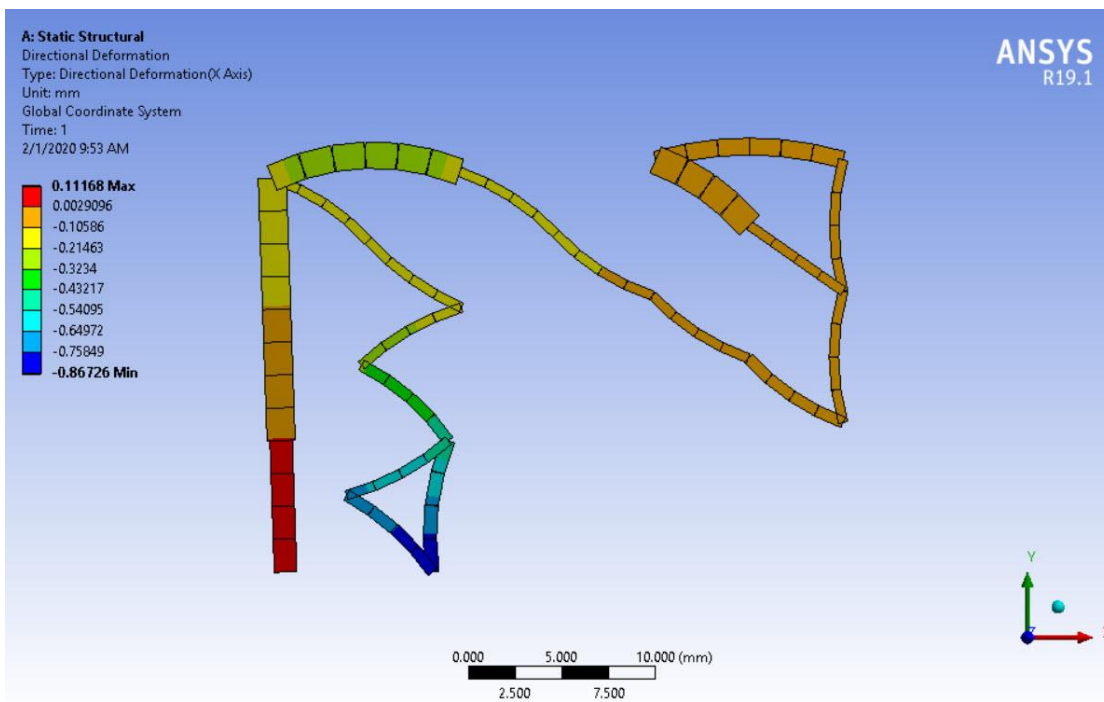
الگوریتم	حداقل تعداد تکرار	مزیت مکانیکی	مزیت مکانیکی (مرجع ۲۸)	بهبود
رقابت استعماری	۴۶۷	۰/۴۴۲	-	٪۱۶۰
ژنتیک	۹۶۷	۰/۴۱۴	۰/۱۷	٪۱۴۱

همان طور که در جدول ۴-۲۷ نشان داده شده است، مکانیزم به دست آمده از الگوریتم های رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۱۶۰ و ۱۴۱ درصد نسبت به مرجع ۲۸ عملکرد بهتری داشته اند. نمودار تابع هدف بر اساس تعداد تکرار در شکل ۴-۳۶ آمده است.

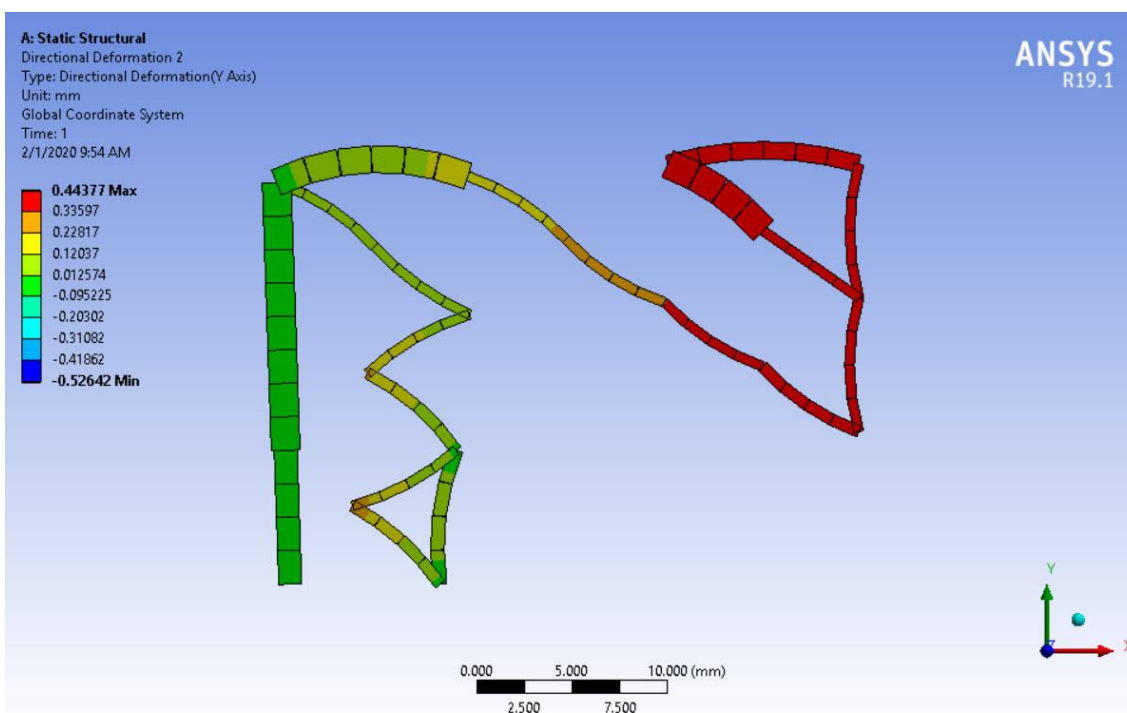


شکل ۴-۳۶: تابع هدف (مزیت مکانیکی) بر حسب تکرار

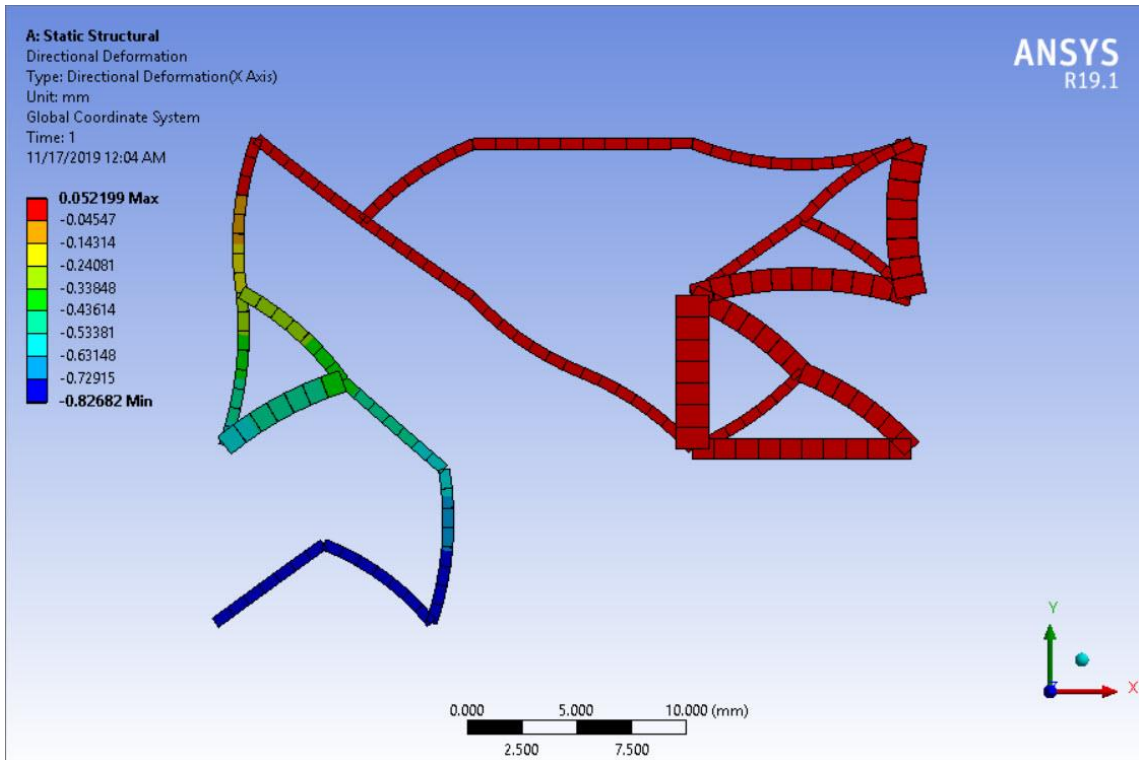
همان‌طور که در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است، در این مثال هر دو الگوریتم جواب متفاوتی نسبت به هم داشتند. الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب به جواب بهینه‌ی ۰/۴۴۲ و ۰/۴۱۴ رسیده‌اند. نتایج جابجایی به‌دست آمده از نرم افزار انسیس در شکل ۴-۳۷ تا شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است. نتایج مقدار جابجایی به‌دست آمده از کدنویسی در جدول ۴-۲۸ و جدول ۴-۲۹ آمده است. همچنین در این جداول نتایج نرم افزار انسیس و مدل ارائه شده با یکدیگر مقایسه شده است.



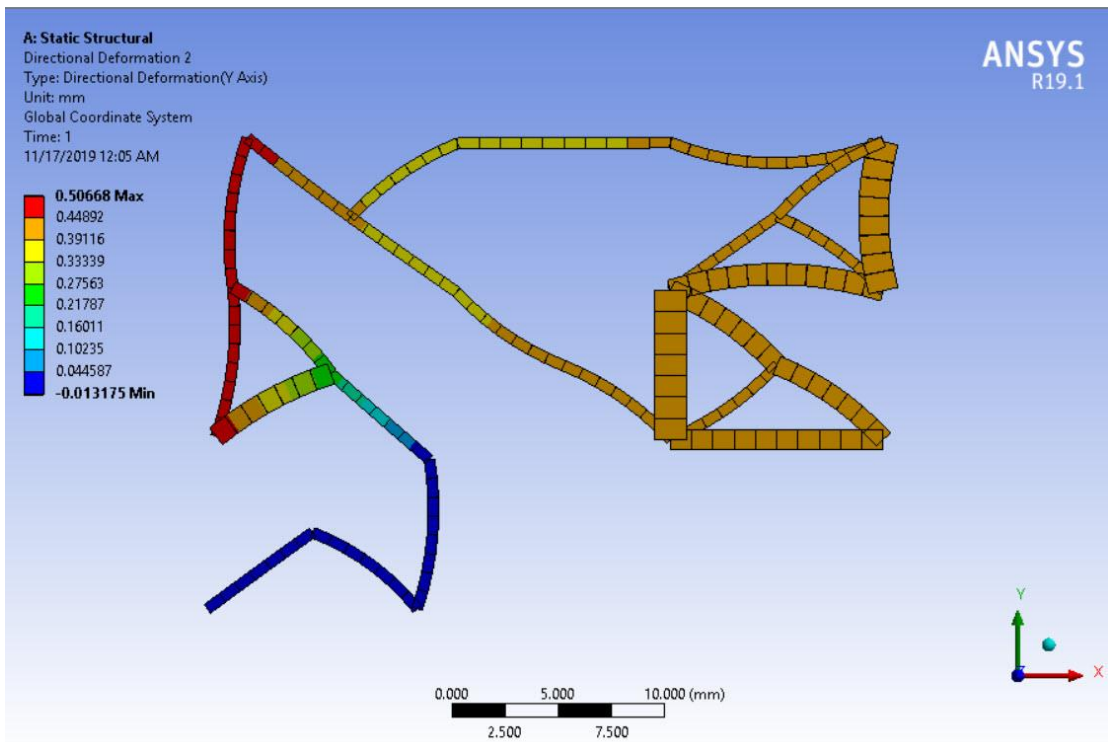
شکل ۴-۳۷: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در راستای x (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری)



شکل ۴-۳۸: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در راستای y (بر اساس الگوریتم رقابت استعماری)



شکل ۴-۳۹: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک)



شکل ۴-۴۰: تحلیل جابجایی مدل به دست آمده در انسیس (بر اساس الگوریتم ژنتیک)

جدول ۴-۲۸: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم رقابت استعماری ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	۰/۸۶۲	۰/۴۴۲	۰/۳۱
انسیس	۰/۸۶۳	۰/۴۴۳	۰/۳۲

جدول ۴-۲۹: مقایسه میزان جابجایی در مدل ارائه شده ( الگوریتم ژنتیک ) و انسیس برای مکانیزم تقویت کننده نیرو

روش	$U_{in} (mm)$	$U_{out} (mm)$	$U_{out}/U_{in}$
مدل ارائه شده	۰/۸۲۵	۰/۴۱۴	۰/۳۱
انسیس	۰/۸۲۶	۰/۴۱	۰/۳۲

بیشینه خطای جابجایی‌ها در مدل ارائه شده نسبت به نرم افزار انسیس برای الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۹ درصد می‌باشد. بنابراین مدل ارائه شده مورد تایید می‌باشد. همچنین قابل ذکر است بیشینه تنش وارد شده به مکانیزم به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری به ترتیب برابر ۲۰۹ و ۱۳۵ مگاپاسکال است در حالی که تنش تسلیم برابر ۲۸۰ مگاپاسکال می‌باشد.



# فصل ۵ : جمع بندی

هدف اصلی از این پروژه بررسی تاثیر تیرهای منحنی بر مکانیزم‌های نرم بوده است. در این پژوهش به استخراج سنتز بهینه سه مکانیزم مختلف پرداخته شده است که عبارتند از:

۱- مکانیزم معکوس کننده

۲- مکانیزم تقویت کننده جابجایی

۳- مکانیزم تقویت کننده نیرو

همچنین در هر مورد نیز مساله بهینه‌سازی در سه حالت مختلف و با متغیرهای طراحی متفاوت حل شده است. متغیرهای طراحی حالت‌های مختلف عبارتند از:

- حالت اول: وجود و یا عدم وجود تیر (مستقیم)

- حالت دوم: وجود و یا عدم وجود تیر (مستقیم و خمیده)

- حالت سوم: وجود و یا عدم وجود تیر (مستقیم و خمیده) بعلاوه ضخامت تیرها (ضخامت درون

صفحه و بیرون صفحه)

تابع هدف مورد استفاده در مثال اول، دوم و سوم به ترتیب عبارتند از: مزیت مکانیکی، مزیت هندسی

و مزیت مکانیکی.

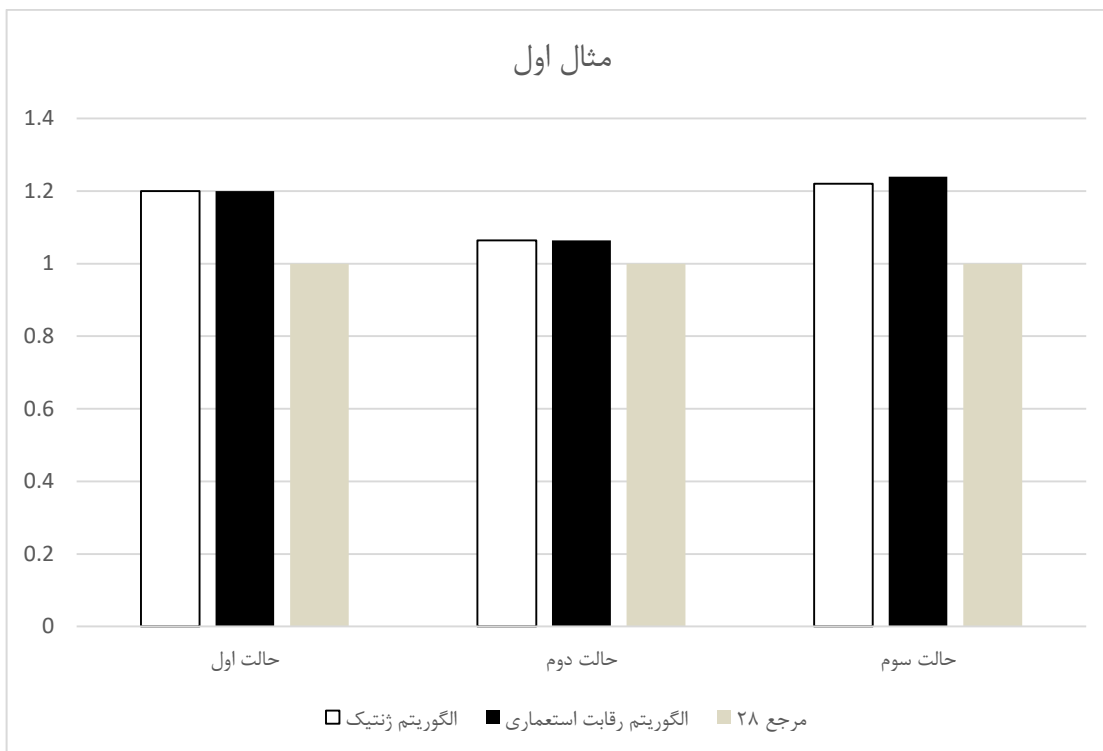
همه حالات در مثال‌های مختلف با دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری حل شده‌اند. نتایج کلی

نشان می‌دهند وجود تیرهای خمیده منجر به بهبود ۲۸ تا ۶۲ درصدی مقادیر توابع هدف نسبت به

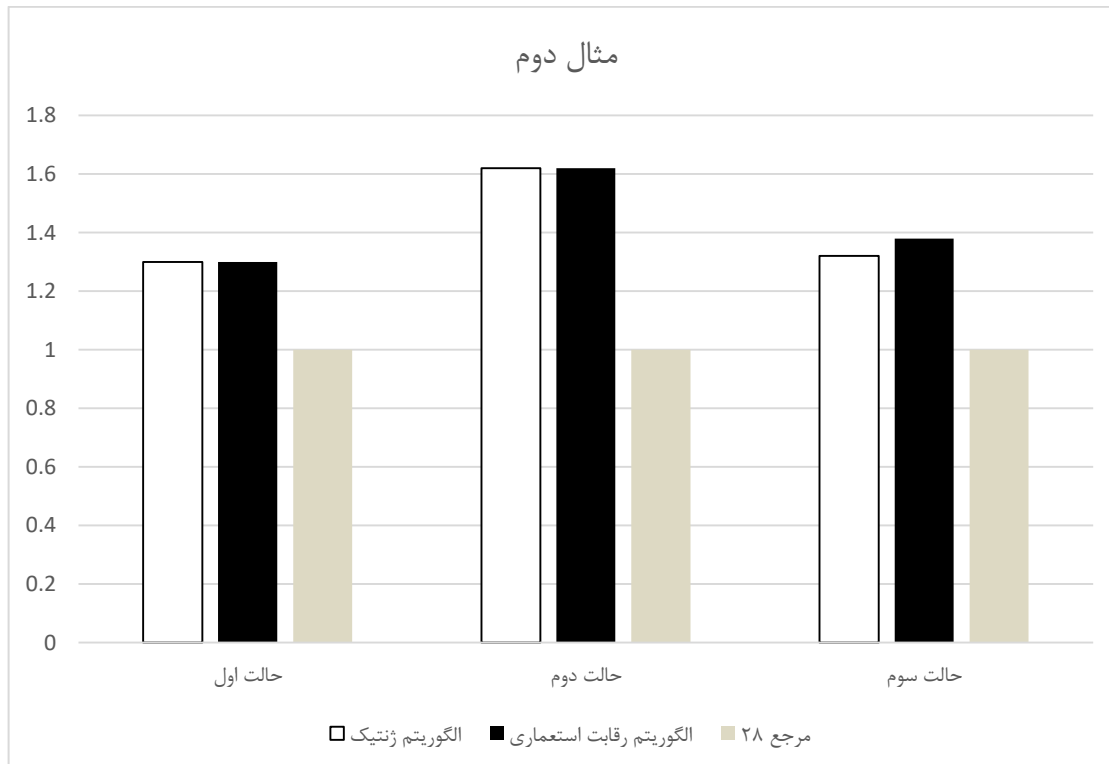
مرجع ۲۸ شده است. نتایج بی‌بعد شده و مقایسه آن‌ها نسبت به مرجع ۲۸ در شکل ۱-۵ تا شکل ۳-۵

نشان داده شده است.

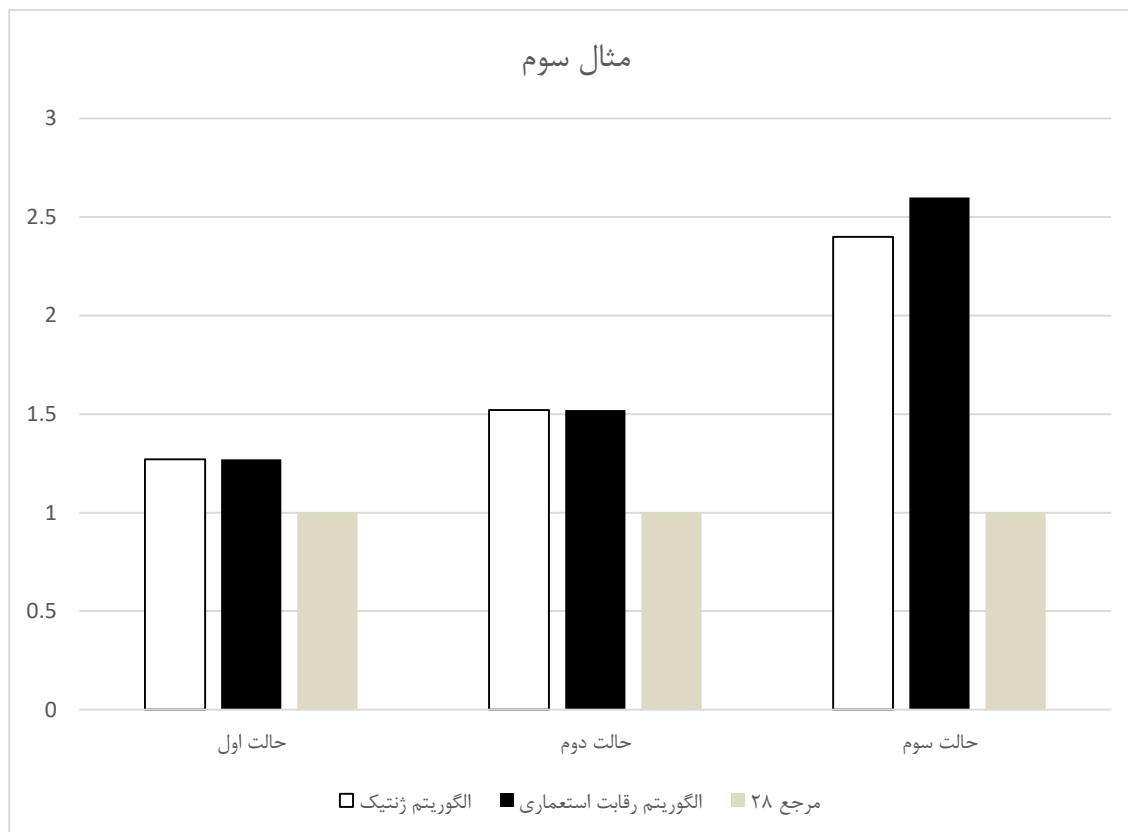




شکل ۵-۱: مقایسه بی بعد مقادیر تابع هدف برای اول



شکل ۵-۲: مقایسه بی بعد مقادیر تابع هدف برای مثال دوم



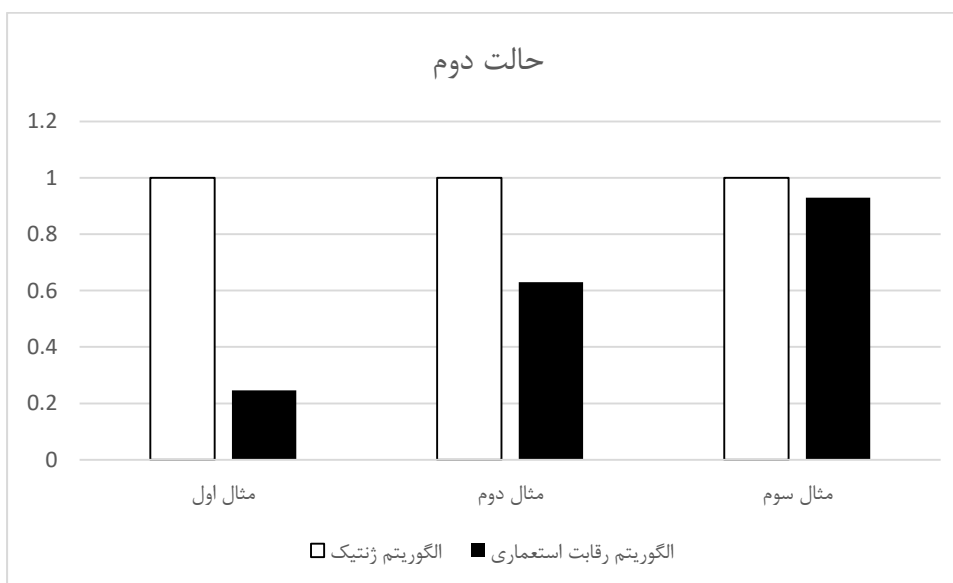
شکل ۳-۵: مقایسه بی بعد مقادیر تابع هدف برای مثال سوم

استفاده همزمان تیر منحنی، شعاع متغیر و ضخامت متغیر منجر به بهبود ۲۱ تا ۱۶۰ درصدی مقادیر تابع هدف نسبت به مرجع ۲۸ شده است. همان طور که در شکل ۱-۵ تا شکل ۳-۵ نشان داده شده است، در حالت اول و دوم حل مساله، هر دو الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری به نتایج مشابهی رسیده‌اند در حالی که در حالت سوم در هر سه مثال الگوریتم رقابت استعماری نتیجه‌ی بهتری داشته است.

با توجه به این که مقدار تابع هدف برای حالت اول و دوم یکسان می‌باشد برای بررسی بیشتر دو الگوریتم به مقایسه‌ی نتایج الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری در مثال‌های حالت اول و دوم پرداخته می‌شود. در شکل ۴-۵ و شکل ۵-۵ به مقایسه بی بعد الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری پرداخته شده است.



شکل ۴-۵: مقایسه بی‌بعد تعداد تکرارهای ICA و GA برای رسیدن به جواب بهینه



شکل ۵-۵: مقایسه بی‌بعد تعداد تکرارهای ICA و GA برای رسیدن به جواب بهینه

همان‌طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده الگوریتم رقابت استعماری بین ۱۸ درصد تا ۷۸ درصد عملکرد بهتری از خود ارائه کرده است. همچنین در شکل ۵-۵، الگوریتم رقابت استعماری بین ۷ تا ۷۸ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته است. در نتیجه در تمامی مثال‌ها الگوریتم رقابت

استعماری از الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است و در تعداد تکرار کمتر به جواب مناسب رسیده است.

نتایج نشان داد که تیرهای خمیده عملکرد مکانیزم‌های نرم را بهبود می‌بخشد. همچنین قابل ذکر است که تیرهای خمیده نسبت به لولاهای خمشی نتایج بهتری را ارائه کرده است. در نتیجه می‌توان با استفاده از تیرهای خمیده به مقدار زیادی محدودیت‌های حرکتی این مکانیزم‌ها را برطرف کرد و از این مکانیزم‌ها بیش از پیش در صنایع و آزمایشگاه‌ها استفاده کرد.

علاوه بر این نشان داده شد که الگوریتم رقابت استعماری از الگوریتم ژنتیک که یکی از بهترین الگوریتم‌های موجود می‌باشد نتیجه‌ی بهتری ارائه کرده است. در نتیجه می‌توان الگوریتم رقابت استعماری را یکی از بهترین الگوریتم‌های موجود در طراحی مکانیزم‌های نرم در نظر گرفت.

به عنوان پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- استفاده از الگوریتم‌های دیگر در سنتز این مکانیزم‌ها
- استفاده‌ی هم‌زمان تیرهای صاف، تیرهای خمیده و لولای خمشی

## مرجع

- [1] Mitchell, Melanie, An introduction to genetic algorithms., MIT press, 1998 .
- [2] Cao, L., Dolovich, A. T., Schwab, A. L., Herder, J. L., & Zhang, W. C, "Toward a unified design approach for both compliant mechanisms and rigid-body mechanisms: Module optimization," *J Mech Design*, vol. 137, no. 12, p. 122301, 2015.
- [3] Howell, Larry L, Compliant mechanisms, John Wiley & Sons, 2001.
- [4] Deepak, S. R., Dinesh, M., Sahu, D. K., & Ananthasuresh, G. K., "A comparative study of the formulations and benchmark problems for the topology optimization of compliant mechanisms," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 1, no. 1, p. 011003, 2009.
- [5] G. Ananthasuresh, "A new design paradigm for micro-electro-mechanical systems and investigations on the compliant mechanisms," *Ph.D, University of Michigan, Ann Arbor*, 1994.
- [6] Jin, M., & Zhang, X, "A new topology optimization method for planar compliant parallel mechanisms," *Mech Mach Theory*, vol. 95, pp. 42-58, 2016.
- [7] Zhu, W. L., Zhu, Z., Guo, P., & Ju, B. F, "A novel hybrid actuation mechanism based XY nanopositioning stage with totally decoupled kinematics," *Mech Syst Signal Pr*, vol. 99, pp. 747-759, 2018.
- [8] Ling, M., Cao, J., Jiang, Z., & Lin, J, "A semi-analytical modeling method for the static and dynamic analysis of complex compliant mechanism," *Precis Eng*, vol. 52, pp. 64-72, 2018.
- [9] Diab, N., & Smaili, A, "An ants-search based method for optimum synthesis of compliant mechanisms under various design criteria," *Mech Mach Theory*, vol. 114, pp. 85-97, 2017.
- [10] Bhagat, U., Shirinzadeh, B., Clark, L., Chea, P., Qin, Y., Tian, Y., & Zhang, D, "Design and analysis of a novel flexure-based 3-DOF mechanism," *Mech Mach Theory*, vol. 74, pp. 173-187, 2014.
- [11] Palaninathan, R., & Chandrasekharan, P. S, "Curved beam element stiffness matrix formulation," *Comput StrucCt*, vol. 21, no. 4, pp. 663-669, 1985.
- [12] Ma, R., Slocum, A. H., Sung, E., Bean, J. F., & Culpepper, M. L, "Torque measurement with compliant mechanisms," *J Mech design*, vol. 135, no. 3, p. 034502., 2013.
- [13] A. Saxena, "Topology design of large displacement compliant mechanisms with multiple materials and multiple output ports," *Struct Multidiscip O*, vol. 30, no. 6, pp. 477-490, 2005.
- [14] Dong, W., Sun, L., & Du, Z, "Stiffness research on a high-precision, large-workspace parallel mechanism with compliant joints," *Precision Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 222-231, 2008.

- [15] Venkiteswaran, V. K., Turkkan, O. A., & Su, H. J, "Speeding up topology optimization of compliant mechanisms with a pseudorigid-body model," *J Mech Robot*, vol. 9, no. 4, p. 041007, 2017.
- [16] Shen, Y., Chen, X., Jiang, W., & Luo, X., "Spatial force-based non-prismatic beam element for static and dynamic analyses of circular flexure hinges in compliant mechanisms," *Precis Eng*, vol. 38, no. 2, pp. 311-320, 2014.
- [17] Martin, T., Gengenbach, U., Guth, H., Ruther, P., Paul, O., & Bretthauer, G, "Silicon linkage with novel compliant mechanism for piezoelectric actuation of an intraocular implant," *Sens. Actuators, A*, vol. 188, pp. 335-341, 2012.
- [18] Venkiteswaran, V. K., & Su, H. J, "Pseudo-Rigid-Body Models of Initially-Curved and Straight Beams for Designing Compliant Mechanisms," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2017.
- [19] Venkiteswaran, V. K., & Su, H. J, "Pseudo-rigid-body models for circular beams under combined tip loads," *Mech Mach Theory*, vol. 106, pp. 80-93, 2016.
- [20] Wang, R., & Zhang, X, "Optimal design of a planar parallel 3-DOF nanopositioner with multi-objective," *MECH MACH THEORY*, vol. 112, pp. 61-83, 2017.
- [21] Saxena, A., & Ananthasuresh, G. K, "On an optimal property of compliant topologies," *Struct MULTidiscip O*.
- [22] Bharanidaran, R., & Ramesh, T, "Numerical simulation and experimental investigation of a topologically optimized compliant microgripper," *Sens. Actuators, A*, vol. 205., pp. 156-163, 2014.
- [23] F. AJ, *MATLAB codes for finite element analysis: solids and structures.*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [24] Yang, M., Du, Z., Chen, F., Dong, W., & Zhang, D, "Kinetostatic modelling of a 3-PRR planar compliant parallel manipulator with flexure pivots," *Precis Eng*, vol. 48, pp. 323-330, 2017.
- [25] S.N.Sivanandam, S.N.Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer, 2006.
- [26] Sano, P., Verotti, M., Bosetti, P., & Belfiore, N. P, "Kinematic Synthesis of a D-Drive MEMS Device with Rigid-Body Replacement Method," *J Mech Design*, vol. 140, no. 7, p. 075001, 2018.
- [27] Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition," in *Iee C Evo Computat*, 2007.
- [28] Cao, L., Dolovich, A. T., & Zhang, W. C, "Hybrid compliant mechanism design using a mixed mesh of flexure hinge elements and beam elements through topology optimization," *J Mech Design*, vol. 137, no. 9, p. 092303, 2015.
- [29] Krishnakumar, A., & Suresh, K, "Hinge-free compliant mechanism design via the topological level-set," *J Mech Design*, vol. 137, no. 3, p. 031406, 2015.
- [30] Li, S., & Yu, "Design principle of high-precision flexure mechanisms based on parasitic-motion compensation. Chinese," *J Mechanical Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 663-672, 2014.
- [31] Polit, S., & Dong, J, "Design of high-bandwidth high-precision flexure-based nanopositioning modules," *J MANUF SYST*, vol. 28, no. 2-3, pp. 71-77, 2009.

- [32] Kota, S., Lu, K. J., Kreiner, Z., Trease, B., Arenas, J., & Geiger, J, "Design and application of compliant mechanisms for surgical tools," *J Biomech Eng*, vol. 127, no. 6, pp. 981-989, 2005.
- [33] P. R. Ouyang, "A spatial hybrid motion compliant mechanism: Design and optimization. *Mechatronics*," *Mechatronics*, vol. 21, no. 3, pp. 479-489., 2011.
- [34] Venkiteswaran, V. K., Turkkan, O. A., & Su, H. J, "Compliant mechanism design through topology optimization using pseudo-rigid-body models," *Int Dent J*, pp. V05AT07A023-V05AT07A023, 2016.
- [35] Saxena, A., & Ananthasuresh, G. K, "An optimality criteria approach for the topology synthesis of compliant mechanisms," *Engineering Technical Conference*, 1998.
- [36] Arunkumar, G., & Srinivasan, P. S. S, "Design of displacement amplifying compliant mechanisms with integrated strain actuator using topology optimization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers," *J Mech Eng Sci*, vol. 220, no. 8, pp. 1219-1228, 2006.
- [37] Krishnan, G., & Ananthasuresh, G. K, "Evaluation and design of displacement-amplifying compliant mechanisms for sensor applications," *J Mech Design*, vol. 130, no. 10, p. 102304, 2008.
- [38] Zhu, Z., Zhou, X., Liu, Z., Wang, R., & Zhu, L, "Development of a piezoelectrically actuated two-degree-of-freedom fast tool servo with decoupled motions for micro-/nanomachining," *Precis Eng*, vol. 38, no. 4, pp. 809-820, 2014.
- [39] Zhang, D., Zhang, Z., Gao, Q., Xu, D., & Liu, S, "Development of a monolithic compliant SPCA-driven micro-gripper," *Mechatronics*, vol. 25, pp. 37-43, 2015.
- [40] Bharanidaran, R., & Ramesh, T, "A modified post-processing technique to design a compliant based microgripper with a plunger using topological optimization," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 1-4, pp. 103-112, 2017.
- [41] Huang, S. C., & Lan, G. J, "Design and fabrication of a micro-compliant amplifier with a topology optimal compliant mechanism integrated with a piezoelectric microactuator," *J Micromech Microeng*, vol. 16, no. 3, p. 531, 2006.
- [42] Polit, S., & Dong, J, "Development of a high-bandwidth XY nanopositioning stage for high-rate micro-/nanomanufacturing," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 724-733, 2010.
- [43] Ansola, R., Veguería, E., Canales, J., & Tárrago, J. A, "A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design," *Finite Elem Anal Des*, vol. 44, no. 1-2, pp. 53-62, 2007.





# Abstract

Due to the flexibility of the compliant mechanisms (CMs), they are utilized to perform mechanical operations (such as motion transfer and power transfer). From the viewpoint of performance, CMs have some advantages over traditional ones, such as higher precision, integrated design, and lower manufacturing costs. However, CMs also have limitations such as limited range of motion. Topology optimization of CMs considering curved beam elements is the main aim of the current study. The straight beams and flexure hinges are usually used to design CMs, but curved beams can improve their performance. The existence and non-existence of the beam elements in the initial synthesis, as well as their type (straight or curved beams), are the most important design variables of this optimization problem. The objective function of this problem is to increase the mechanical and geometrical advantages (MA and GeA) of the CMs. In the current study, two methods including genetic and imperialist competition algorithms (GA and ICA) were used to derive the optimal structure of the CMs. In addition, the results of these two algorithms are also compared for different examples. The optimized CMs that consist of beam elements are analyzed with the finite element method. The results show that the existence of curved beams in CMs may improve their performance and increase the defined objective functions. In addition, the comparison of the two algorithms used shows that ICA performs better than the GA, which is one of the most powerful methods in optimization.

**Keywords:** Compliant mechanisms, Topology optimization, Curved beam, Genetic algorithm, Imperialist competition algorithm





Shahrood University of  
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronics Engineering

# *Optimal Synthesis Of The Compliant Mechanisms With Curved Beam*

By: Mehdi Mokhtari Karchegani

Supervisor:

Dr. Seyyed Mojtaba Varedi-Koulaei

January, 2020