

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

بهبود خصوصیات دینامیکی مکانیزم صفحه‌ای دارای مفاصل لق با استفاده از

مفاصل خمشی

نگارنده:

علیرضا جلالی

استاد راهنما:

سید مجتبی واردی کولائی

شهریور ۱۴۰۰

تقدیم بہ

ماحصل آموختہ ایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مرا آسانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین محاکہ زندگیم، چشمان سبز مادرم

کہ ہرچہ آموختم در مکتب عشق شما آموختم و ہرچہ بگو شتم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانی تان را پاس نتوانم گفت

امروز، ہستی ام بہ امید شماست و فردا کلید بلخ بہ شتم رضای شما

رہ آوردی کران منک تر از این ارزان نہ داشتم تا بہ خاک پایتان نثار کنم، باشد کہ حاصل تلاشم نسیم کونہ غبار محنتی تان را بزوداید

بوسہ بردستان پر مہر تان

شکر و قدردانی

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید مجتبی واردی کولائی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم.

تهدنامه

اینجانب علیرضا جلالی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش مکترونیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهبود خصوصیات دینامیکی مکانیزم صفحه‌ای دارای مفاصل لق با استفاده از مفاصل خمشی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید مجتبی واردی کولائی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات 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 بوده‌اند 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 .

امضای دانشجو

تاریخ

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 .

مفاصل سنتی همواره مقداری لقی در خود دارند که موجب افزایش ارتعاشات و شتابها و نیروها در مکانیزم می‌شود. مفاصل خمشی نوع جدیدی از مفاصل هستند که لقی در آنها حذف شده و می‌توانند بصورت یکپارچه ساخته شوند. وجود سفتی ذاتی در مفاصل خمشی موجب افزایش سفتی کل مکانیزم می‌شود و این امر می‌تواند مشکلات ناشی از لقی در دیگر مفاصل را کاهش دهد. هدف این پژوهش کاهش اثرات لقی مفاصل با استفاده از مفاصل خمشی می‌باشد. در ابتدا معادلات دینامیکی یک مکانیزم صفحه‌ای که دارای مفصل لق و همچنین مفصل خمشی بوده استخراج شده است. از مکانیزم لنگ و لغزنده به عنوان یک مکانیزم صفحه‌ای بهره برده شده و کلیه فرایندها بر روی آن اجرا شده‌اند. برای استخراج معادلات دینامیکی از رابطه لاگرانژ استفاده شده و مدل‌سازی مفاصل خمشی براساس مدل شبه‌جسم صلب انجام شده که در آن مفصل خمشی به صورت یک فنر پیچشی مدل‌سازی می‌شود. طراحی چندین نوع مختلف از مفاصل خمشی براساس تعریف مساله بهینه‌سازی انجام و طرح بهینه برای هر کدام بدست آمده است. متغیرهای طراحی مساله بهینه‌سازی شامل اندازه‌های هندسی مفصل موردنظر و جنس آن می‌باشد. برای تابع هدف نیز از کاهش بیشینه شتابهای اعضای مکانیزم استفاده شده است. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از سه روش فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ملخ حل و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند استفاده از مفاصل خمشی در مکانیزم موردنظر توانسته تا حد قابل توجهی مقادیر بیشینه شتابها را کاهش دهد.

کلمات کلیدی:

مفصل لق، مفاصل خمشی، مکانیزم لنگ و لغزنده، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ملخ.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه‌ای بر مکانیزم‌های نرم
۲	۱-۱: مکانیزم‌های متداول
۲	۲-۱: مکانیزم‌های نرم
۶	۳-۱: ساختار کلی پایان‌نامه
۷	فصل دوم: مفاصل خمشی
۸	۱-۲: انواع مفاصل خمشی
۱۳	۲-۲: مدل شبه جسم صلب
۱۵	۳-۲: روابط حاکم بر مفاصل خمشی
۱۸	۴-۲: کارهای پیشین در حوزه‌ی مفاصل نرم
۲۱	فصل سوم: لقی و اثرات آن
۲۲	۱-۳: تعریف لقی و انواع آن
۲۴	۲-۳: معادلات حاکم در مفصل لق
۲۸	۳-۳: کارهای پیشین در حوزه‌ی لقی
۲۹	۴-۳: معادله حرکت مکانیزم لنگ و لغزنده
۲۹	۱-۴-۳: مکانیزم لنگ و لغزنده ایده‌آل
۳۲	۲-۴-۳: مکانیزم لنگ و لغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی
۳۷	فصل چهارم: بهینه‌سازی مسئله و الگوریتم‌ها
۳۸	۱-۴: مسئله بهینه‌سازی
۳۹	۲-۴: الگوریتم‌های بهینه‌سازی
۴۰	۱-۲-۴: الگوریتم ژنتیک
۴۲	۲-۲-۴: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۴۶	-----	۳-۲-۴: الگوریتم بهینه‌سازی ملخ
۵۱	-----	فصل پنجم: نتایج
۵۲	-----	۱-۵: مکانیزم بدون مفصل خمشی
۵۲	-----	۱-۱-۵: مکانیزم ایده‌آل بدون مفصل لق و بدون مفصل خمشی
۵۲	-----	۲-۱-۵: مکانیزم دارای یک مفصل لق و بدون مفصل خمشی
۵۶	-----	۲-۵: نتایج مفصل شماره ۱
۶۱	-----	۳-۵: نتایج مفصل شماره ۲
۶۶	-----	۴-۵: نتایج مفصل شماره ۳
۷۱	-----	۵-۵: نتایج بهترین الگوریتم و بهترین مفصل
۷۵	-----	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۶	-----	۱-۶: نتیجه گیری
۷۶	-----	۲-۶: پیشنهادات
۷۸	-----	منابع و مراجع

فهرست اشکال

۴	شکل ۱-۱: انواع تجاری قطعات نرم-----
۵	شکل ۲-۱: انواع مکانیزم‌ها-----
۹	شکل ۱-۲: مفصل خمشی (نرم)-----
۹	شکل ۲-۲: مفصل خمشی انتقالی (کشویی) و لولایی-----
۱۰	شکل ۳-۲: انواع مختلف مفصل نرم لولایی-----
۱۴	شکل ۴-۲: مدل شبه جسم صلب-----
۱۵	شکل ۵-۲: تبدیل یک مکانیزم چهارمیله‌ای نرم براساس مدل شبه جسم صلب-----
۱۶	شکل ۶-۲: مفصل خمشی مورد استفاده در این پژوهش-----
۲۳	شکل ۱-۳: وجود لقی در مفصل لولایی و کشویی صفحه‌ای-----
۲۴	شکل ۲-۳: انواع مدهای حرکتی در مفصل دورانی دارای لقی-----
۲۵	شکل ۳-۳: مفصل دورانی دارای لقی-----
۲۵	شکل ۴-۳: مفصل لولایی دارای لقی و نیروهای تماسی آن-----
۳۰	شکل ۵-۳: مکانیزم لنگ‌ولغزنده-----
۳۳	شکل ۶-۳: مکانیزم لنگ‌ولغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی-----
۳۳	شکل ۷-۳: استفاده از مدل شبه جسم صلب در مفصل خمشی مکانیزم لنگ‌ولغزنده-----
۳۵	شکل ۸-۳: دیاگرام آزاد اعضای مختلف مکانیزم-----
۴۲	شکل ۱-۴: فلوچارت الگوریتم ژنتیک-----
۴۵	شکل ۲-۴: فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات-----
۴۸	شکل ۳-۴: الگوهای اصلاح شده در الگوریتم ملخ-----
۵۰	شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم ملخ-----
۵۳	شکل ۵-۱: نمودارهای جابجایی، سرعت و شتاب لغزنده برای مکانیزم کاملاً ایده‌آل-----

- شکل ۵-۲: نمودارهای تغییر زاویه لینک ۳ و سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای آن برای مکانیزم کاملاً ایده‌آل ----- ۵۴
- شکل ۵-۳: نمودارهای مکانیزم لنگ‌ولغزنده دارای یک مفصل لقی و یک مفصل ایده‌آل ----- ۵۵
- شکل ۵-۴: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۱ ----- ۵۸
- شکل ۵-۵: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۱ ----- ۵۹
- شکل ۵-۶: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۱ ----- ۶۰
- شکل ۵-۷: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۱ ----- ۶۱
- شکل ۵-۸: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۲ ----- ۶۳
- شکل ۵-۹: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۲ ----- ۶۴
- شکل ۵-۱۰: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۲ ----- ۶۵
- شکل ۵-۱۱: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۲ ----- ۶۶
- شکل ۵-۱۲: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۳ ----- ۶۸
- شکل ۵-۱۳: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۳ ----- ۶۹
- شکل ۵-۱۴: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۳ ----- ۷۰
- شکل ۵-۱۵: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۳ ----- ۷۱
- شکل ۵-۱۶: مقایسه روش‌های بهینه‌سازی برای مفاصل مختلف ----- ۷۳

فهرست جداول

۱۱	جدول ۱-۲: مفاصل لولایی خمشی (نرم)-----
۱۳	جدول ۲-۲: مفاصل انتقالی (کشویی) نرم-----
۱۸	جدول ۳-۲: مشخصات چند ماده مورد استفاده در تولید مفاصل نرم-----
۵۶	جدول ۱-۵: نتایج مربوط به مفصل شماره ۱-----
۶۱	جدول ۲-۵: نتایج مربوط به مفصل شماره ۲-----
۶۷	جدول ۳-۵: نتایج مربوط به مفصل شماره ۳-----
۷۲	جدول ۴-۵: درصد بهبود مفاصل مختلف-----

فصل اول

مقدمه‌ای بر مکانیزم‌های نرم

۱-۱- مکانیزم‌های متداول

مکانیزم‌های متداولی که در کاربردهای معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً دارای اعضای صلب می‌باشند که بوسیله برخی از مفاصل، از جمله مفاصل لولایی و کشویی بهم متصل شده‌اند. این مکانیزم‌ها همچنین دارای مفاصلی هستند که وجود مقداری لقی در بین سطوح در حال تماس در آن‌ها امری الزامی است. لقی هم می‌تواند در مفاصل لولایی و هم در مفاصل کشویی وجود داشته باشد. از سوی دیگر بعد از مدتی از کارکرد مکانیزم، مقدار لقی به تدریج افزایش می‌یابد و آنگاه اثرات آن حتی می‌تواند موجب خرابی در دستگاه موردنظر شود. بنابراین بررسی‌های با زمان مشخص برای لقی مفاصل و کاهش اثرات آن امری ضروری است.

یکی از عواملی که موجب ایجاد خطا در مکانیزم‌ها و ربات‌ها می‌شود وجود لقی در مفاصل است. وجود فواصل اجتناب‌ناپذیر بین سطوح در همه انواع مفاصل، از جمله مفاصل لولایی، کشویی و غیره وجود دارد. همچنین این امر موجب ایجاد ارتعاشات و سروصدای زیادی در مکانیزم می‌شود. عدم توجه به لقی در مفاصل همواره موجب افت عمر تکیه‌گاه‌ها و در کل خرابی زودهنگام مکانیزم‌ها خواهد شد. حذف اثرات لقی و یا کاهش آن موجب پیدایش نسل جدیدی از مکانیزم‌ها شده است که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۱-۲- مکانیزم‌های نرم

به طور سنتی، یک مکانیزم از اعضا یا لینک‌های صلب^۱ ساخته شده و از طریق جفت‌های سینماتیکی مانند اتصالات پین، برای تبدیل حرکت و یا انتقال نیروها بین مکانیزم و محیط، به هم متصل می‌شوند. با این حال، مشاهده ساختارهای موجود در طبیعت نشان می‌دهد که برخی از آن‌ها حرکت خود را از تغییر شکل اعضای نرم

¹ rigid

و منعطف بودن به دست می‌آورند. برای مثال، حشراتی مثل کک از انعطاف‌پذیری موجود در بدن برای جهش بیشتر استفاده می‌کنند، و پرندگان از بال‌های انعطاف‌پذیر خود برای بال‌زدن و پرواز بهره می‌برند. منعطف‌بودن نقش مهمی در طبیعت ایفا می‌کند و جامعه مهندسی و طراحان ماشین‌آلات مدرن را با یک مفهوم جدید روبه‌رو می‌کند [۱].

مکانیزم‌های نرم^۲ گونه‌ای جدید از مکانیزم‌ها هستند که برخی از عضوهای آن‌ها و یا همه‌ی آن عضوها انعطاف‌پذیر هستند. البته مکانیزم‌های نرم معمولاً دارای مفاصل نرم و یا مفاصل خمشی نیز هستند و استفاده از این مفاصل دایماً در حال افزایش است. یک مکانیزم نرم ممکن است که تنها از یک مفصل نرم (خمشی) و یا ترکیبی از چندین مفصل نرم باشد و یا می‌تواند حتی دارای مفاصل صلب نیز باشد. در مکانیزم‌های سنتی از اعضای صلب و مفاصل متداول لولایی و کشویی استفاده می‌شده است. از معایب مفاصل سنتی می‌توان به هزینه‌ی مونتاژ و نگهداری بالا، افزایش لقی مفصل در نتیجه خوردگی و سایش سطوح و در نتیجه کاهش دقت در مکانیزم اشاره کرد. در نتیجه محققین و صنعت‌گران در دو سه دهه‌ی اخیر توجه و تمرکز بیشتری به مکانیزم‌های نرم و استفاده از مفاصل خمشی داشته‌اند.

مکانیزم‌های نرم (خمشی) دارای عضوهای نرم‌تر و مفاصل سفت‌تر نسبت به مفاصل سنتی می‌باشند [۲، ۳، ۴].

مزایای مکانیزم‌های نرم نسبت به مکانیزم‌های سنتی را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- کاهش هزینه تولید بدلیل عدم نیاز به مونتاژ
- امکان ساخت یکپارچه مکانیزم بوسیله‌ی ابزارهایی مشابه پرینتر سه‌بعدی
- کاهش زمان طراحی و ساخت مجموعه
- افزایش دقت مکانیزم بدلیل حذف لقی از مفصل
- کاهش نیاز به تعمیرات و هزینه نگهداری

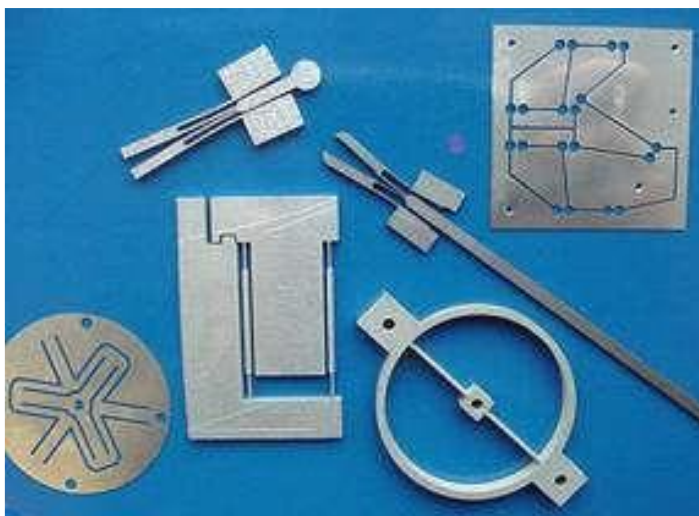
² Compliant mechanism

- کاهش ضربه، ارتعاش و سروصدا بدلیل حذف لقی

با توجه به مزایای فوق، استفاده از این مکانیزم‌ها در کاربردهای با دقت بالا و ابزارآلات میکروالکترومکانیکی^۳ و وسایل مینیاتوری در حال افزایش است.

از سوی دیگر، از معایب مکانیزم‌های نرم نسبت به مکانیزم‌های سنتی می‌توان به بازه‌ی حرکتی کمتری که دارند اشاره کرد. حرکت در مکانیزم‌ها و مفاصل نرم وابستگی زیادی به ساختار ماده‌ی تشکیل‌دهنده آن‌ها دارد و این باعث می‌شود که بازه حرکتی این مکانیزم‌ها وابسته به خواص مکانیکی آن ماده باشد. از دیگر معایب مکانیزم‌های نرم می‌توان به معادلات غیرخطی و چالش‌های موجود در تحلیل سینماتیکی و دینامیکی آن‌ها اشاره کرد.

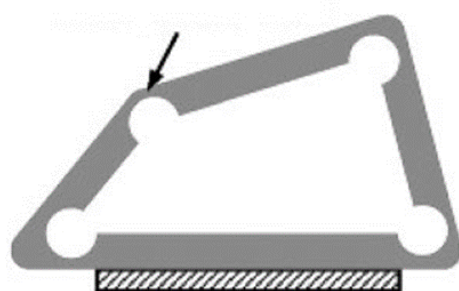
با توجه به افزایش روزافزون استفاده از مکانیزم‌های نرم، در سال‌های اخیر توجه زیادی به آن شده است. در برخی از این کاربردها می‌توان به کاربردهای پزشکی، رباتیک، بیومکانیک و صنعت هوافضا اشاره کرد [۳، ۱]. شکل ۱-۱ از انواع کاربردهای تجاری این مکانیزم‌ها را نشان می‌دهد.



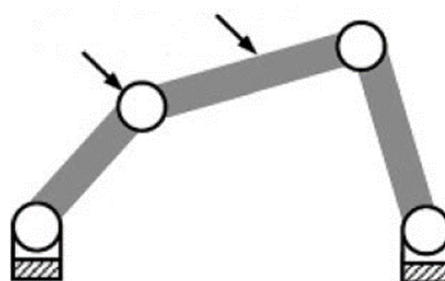
شکل ۱-۱: انواع تجاری قطعات نرم [۱]

³ Micro electro mechanical systems

مکانیزم نرم کلوخه‌ای (توده‌ای) یک مکانیزم معمولی شامل لینک‌های صلب و مفاصل خمشی می‌باشد که نمونه‌ای از آن را می‌توان در شکل ۱-۲-ب مشاهده کرد. در مکانیزم نرم توزیعی هیچ‌گونه مفصلی وجود ندارد و جابجایی این مکانیزم به‌طور کامل نتیجه تغییر شکل عضوهای انعطاف‌پذیر می‌باشد. نمونه‌ای از این مکانیزم در شکل ۱-۲-ج نشان داده شده است. در مکانیزم نرم ترکیبی، از همه حالت‌های مکانیزم نرم کلوخه‌ای، مکانیزم نرم توزیعی و مکانیزم سنتی بهره‌برده شده است و ترکیبی از مفاصل سنتی، مفاصل خمشی، لینک‌های صلب و لینک‌های انعطاف‌پذیر در آن مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌ای از مکانیزم نرم ترکیبی را می‌توان در شکل ۱-۲-د مشاهده کرد.



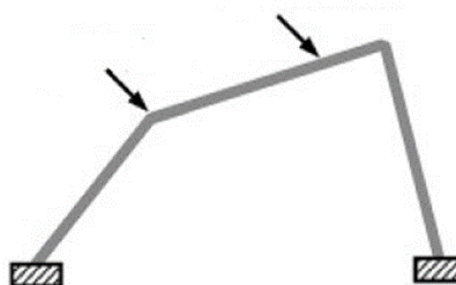
(ب) مکانیزم نرم کلوخه‌ای (توده‌ای)



(الف) مکانیزم سنتی



(د) مکانیزم نرم ترکیبی



(ج) مکانیزم نرم توزیعی

شکل ۱-۲: انواع مکانیزم‌ها [۱].

۱-۳- ساختار کلی پایان نامه

در ادامه پایان نامه، در فصل دوم به معرفی انواع مفاصل خمشی و روابط حاکم بر آن‌ها پرداخته خواهد شد. در فصل سوم نیز روابط مربوط به لقی مفاصل ارائه شده و معادلات دینامیکی مکانیزم لنگ و لغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی استخراج خواهد شد. در فصل چهارم نیز به توضیح فرایند بهینه‌سازی شامل متغیرهای طراحی و تابع هدف پرداخته شده و سپس الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده تشریح خواهند شد. نتایج بهینه‌سازی و شرح و تفسیر آن‌ها نیز در فصل پنجم ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مفاصل خمشی

۲-۱- انواع مفاصل خمشی

استفاده از مفاصل خمشی در مکانیزم‌ها، به منظور کاهش اثرات لقی، موضوع اصلی این پژوهش است، بنابراین در این بخش به توضیح این مفاصل پرداخته خواهد شد. معمولاً در مکانیزم‌های سنتی از مفاصل کشویی و لولایی متداول استفاده می‌شده است، اما وجود لقی بین اجزای این مفاصل موجب واکنش‌های شدید مکانیکی می‌شود. علاوه بر این در تمام اتصالات فوق، حرکت نسبی موجود باعث ایجاد اصطکاک شده که منجر به فرسایش و افزایش لقی می‌شود.

وجود لقی هم موجب خطاهای سینماتیکی (کاهش دقت در تولید مسیر) شده و هم از نظر دینامیکی مشکلاتی همچون ارتعاش، سروصدا و استهلاک تکیه‌گاه‌ها را موجب می‌شود. این مشکلات باعث شد محققین در جست‌وجوی مفاصل جدیدتری باشند و مفاصل خمشی که دارای سفتی هستند را در برخی از کاربردها جایگزین مفاصل سنتی کنند. این مفاصل، بدلیل ساخت یکپارچه، مشکلات ناشی از لقی و اثرات مربوط به سایش و خوردگی را نخواهد داشت. دقت بالای مفاصل خمشی باعث شده که در بسیاری از کاربردها در حوزه‌ی میکرو و نانو استفاده‌های زیادی از این مفاصل در مقیاس‌های کوچک شود. همچنین ساختار یکپارچه این مفاصل تولید را ساده‌تر کرده و فرایند ساخت با هزینه کمتری انجام می‌شود. با پیدایش این نوع از مفاصل در چند دهه اخیر، تحقیق و بررسی انواع مختلف آن‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است [۵].

پاروس^۴ و ویسبرد^۵ در سال ۱۹۶۵ اولین کسانی بودند که از مفاصل شکافدار انعطاف‌پذیر رونمایی کردند و از آن زمان به بعد بسیاری از محققین و طراحان از این مفاصل استفاده کردند [۶]. این مفاصل به دلیل دقت بسیار بالا کاربرد بسیار زیادی دارند. شکل ۱-۲ اولین نمونه‌های مفاصل خمشی را نشان می‌دهد. شکل ۱-۲-الف یک مفصل خمشی انتقالی (کشویی)، شکل ۱-۲-ب مفصل شکافدار کروی و شکل ۱-۲-ج نیز مفصل شکافدار

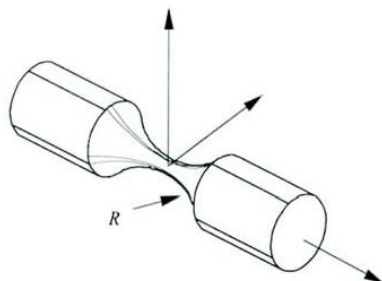
^۴ Paros

^۵ weisbord

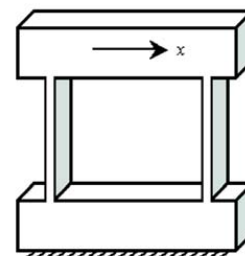
لولایی (دورانی) را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است از خاصیت انعطاف‌پذیری اجزا در طراحی این مفاصل استفاده شده است.



ج) مفصل شکاف‌دار صفحه‌ای



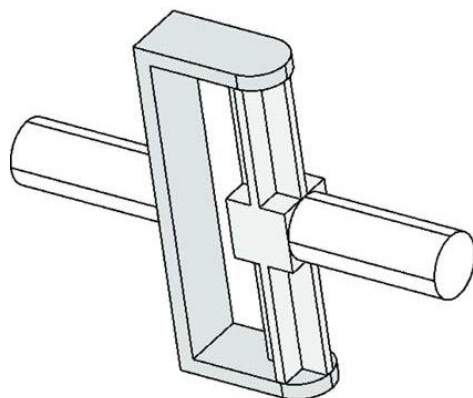
ب) مفصل شکاف‌دار کروی



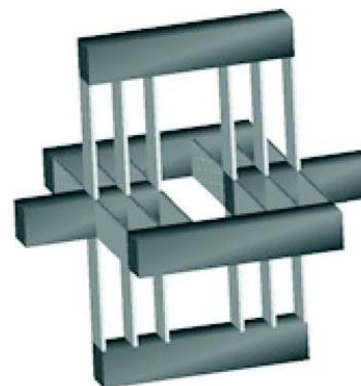
الف) مفصل انتقالی چهارلینکی

شکل ۲-۱: مفاصل خمشی (نرم) [۵].

شکل ۲-۲ نیز نمونه‌های جدیدتری از مفاصل خمشی کشویی و لولایی را نشان می‌دهد که توسط تریس^۶ معرفی شده است.



ب) مفصل لولایی

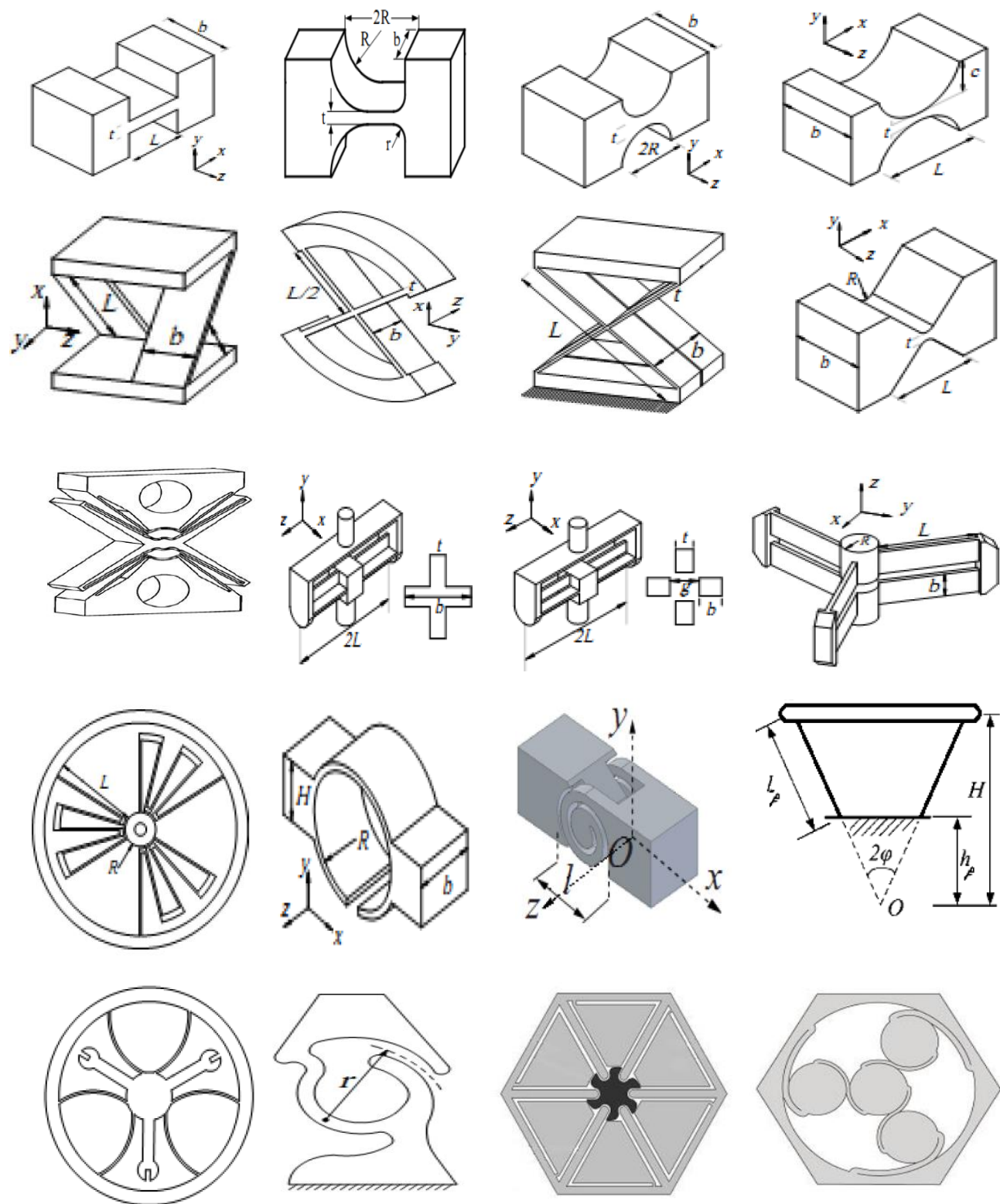


الف) مفصل انتقالی

شکل ۲-۲: مفاصل خمشی انتقالی (کشویی) و لولایی [۵].

البته باید توجه نمود که طراحی و ساخت این مفاصل روزبه‌روز در حال پیشرفت است و در سال‌های اخیر طرح‌های متنوعی از این مفصل ایجاد شده است. شکل ۲-۳ انواع مختلف مفاصل خمشی لولایی را نشان می‌دهد که فرهادی در مقاله خود آن‌ها را معرفی کرده است [۷].

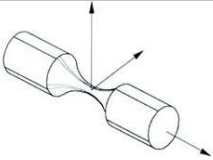
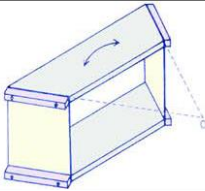
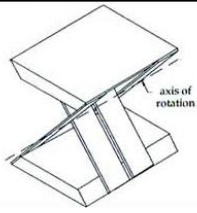
⁶ Trease

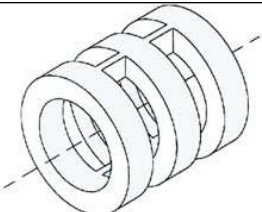
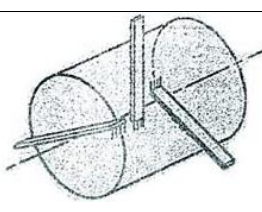
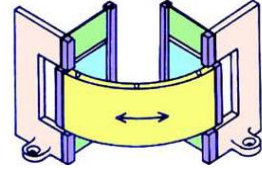
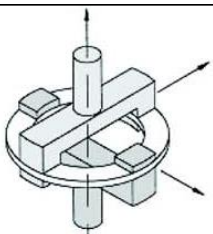
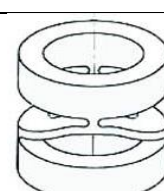
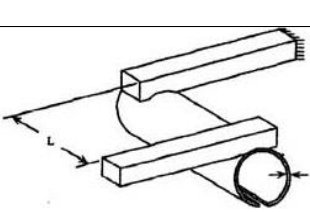
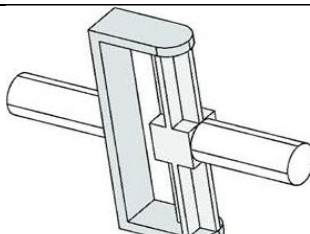


شکل ۲-۳: انواع مختلف مفاصل نرم لولایی [۷].

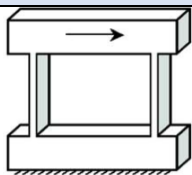
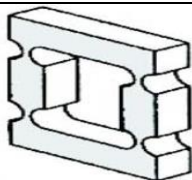
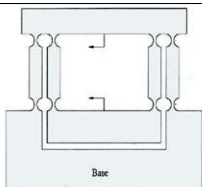
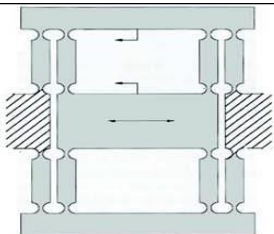
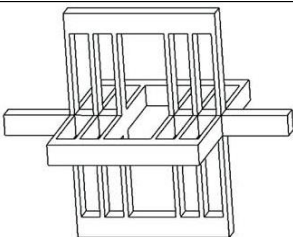
معیارهای مختلفی برای طراحی و انتخاب مفاصل خمشی، براساس مزایا و معایب آنها، وجود دارد که باید به آنها توجه نمود. در جدول ۱-۲ مقایسه‌ای بین انواع مفاصل خمشی لولایی پرکاربرد براساس معیارهای محدوده دوران، تغییر محور دوران، تمرکز تنش، سفتی خارج از محوری و کم حجم بودن انجام شده است که سفتی خارج از محوری را به سفتی مفاصل خمشی خارج از محدوده مشخص که اجازه حرکتی بیشتری دارند گویند. همچنین مقایسه مشابهی بین مفاصل خمشی کشویی در جدول ۲-۲ انجام شده است [۵، ۸، ۹].

جدول ۱-۲: مفاصل لولایی خمشی (نرم) [۵]

کم حجم بودن	سفتی خارج از محوری	تمرکز تنش	تغییر محور دوران	محدوده دوران	
قوی	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	
نرمال	ضعیف	قوی	ضعیف	نرمال	
ضعیف	ضعیف	قوی	ضعیف	قوی	
قوی	ضعیف	نرمال	ضعیف	ضعیف	

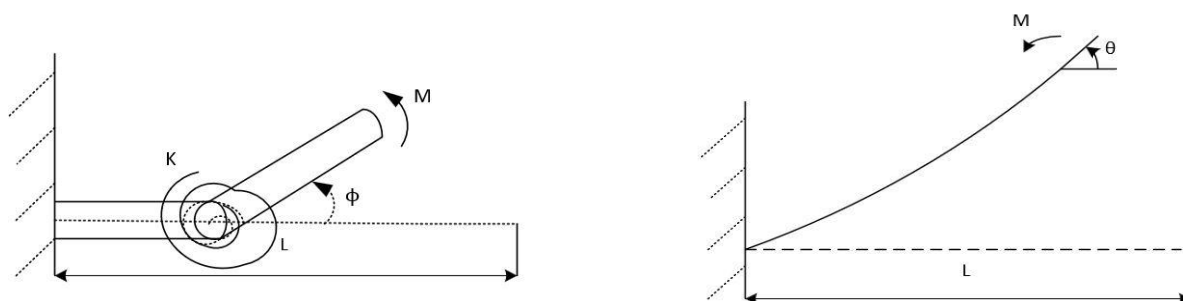
	ضعیف	نرمال	ضعیف	نرمال	نرمال
	ضعیف	قوی	نرمال	ضعیف	ضعیف
	قوی	قوی	قوی	ضعیف	ضعیف
	ضعیف	قوی	ضعیف	ضعیف	ضعیف
	ضعیف	نرمال	ضعیف	ضعیف	نرمال
	قوی	نرمال	قوی	قوی	نرمال
	قوی	قوی	قوی	قوی	نرمال

جدول ۲-۲: مفاصل انتقالی (کشویی) نرم [۵]

کم حجم بودن	سفتی خارج از محوری	تمرکز تنش	تغییر محور دوران	محدوده دوران	
قوی	نرمال	نرمال	ضعیف	نرمال	
قوی	نرمال	ضعیف	ضعیف	ضعیف	
قوی	نرمال	ضعیف	نرمال	ضعیف	
قوی	نرمال	ضعیف	قوی	ضعیف	
قوی	قوی	قوی	قوی	قوی	

۲-۲- مدل شبه جسم صلب

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در تحلیل اعضای انعطاف‌پذیر و مفاصل خمشی، معمولاً از مدل شبه‌جسم‌صلب^۷ برای تحلیل رفتار سینماتیکی و دینامیکی آن‌ها بهره‌برده می‌شود. در مدل شبه‌جسم‌صلب، لینک‌های انعطاف‌پذیر بوسیله یک فنر پیچشی معادل و یک عضو صلب جایگزین می‌شوند. رویکرد این مدل اینگونه است که از اطلاعات و دانش موجود در سینماتیک جسم صلب‌ها استفاده می‌کند و بنابراین ابزار کارآمد برای تجزیه و تحلیل و ترکیب مکانیزم‌های نرم در اختیار طراحان قرار می‌دهد. این مدل جهت ساده‌سازی تحلیل مکانیزم‌های نرم (خمشی) ابتدا توسط هاول و میدها در سال ۱۹۸۷ ارائه و استفاده شد. شکل ۲-۴ نحوه عملکرد مدل موردنظر را نشان می‌دهد.

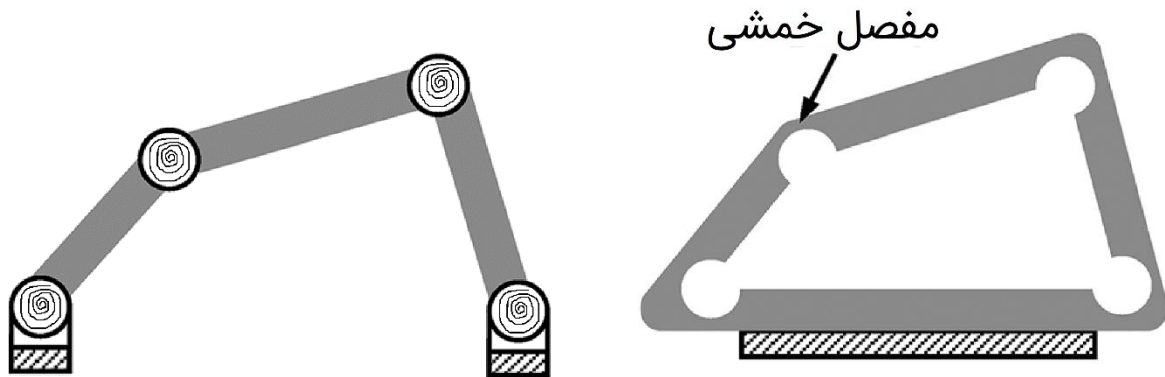


شکل ۲-۴: مدل شبه جسم صلب

در این مدل، سفتی موجود در عضو انعطاف‌پذیر از طریق فنر پیچشی اعمال می‌شود و در عوض، عضو متصل به تکیه‌گاه بصورت صلب در نظر گرفته می‌شود. براساس این مدل، همه مفاصل خمشی را نیز می‌توان با یک فنر پیچشی معادل جایگزین نمود. بدیهی است مقدار سفتی این فنر پیچشی معادل، به مشخصات هندسی مفصل خمشی موردنظر بستگی دارد. با توجه به پیشرفت روش‌های تحلیل و طراحی در مکانیزم‌های سنتی، استفاده از این مدل باعث می‌شود یک مکانیزم نرم و انعطاف‌پذیر را بتوان به یک مکانیزم سنتی، دارای مفاصل معمولی، بعلاوه چندین فنر پیچشی در محل مفاصل تبدیل نمود. شکل ۲-۵ تبدیل یک مکانیزم چهارمیله‌ای نرم براساس

⁷ Pseudo rigid body model (PRBM)

مدل شبه‌جسم‌صلب را نشان می‌دهد. مثال‌های زیادی توسط هاول و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است که شامل تحلیل استاتیکی و دینامیکی مکانیزم‌های نرم و براساس مدل شبه‌جسم‌صلب می‌باشد [۱۰، ۱].



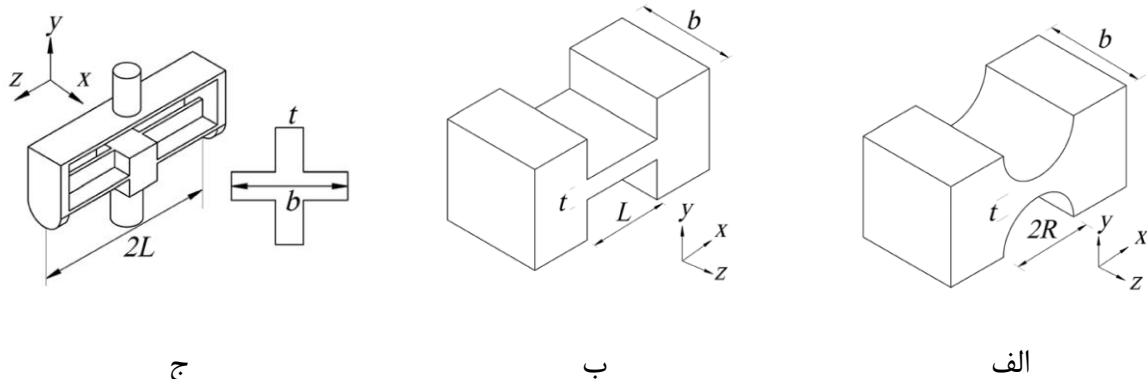
ب- مدل شبه‌جسم‌صلب

الف- مکانیزم چهارمیله‌ای نرم

شکل ۲-۵: تبدیل یک مکانیزم چهارمیله‌ای نرم براساس مدل شبه‌جسم‌صلب

۲-۳- روابط حاکم بر مفاصل خمشی

سفتی محوری و محدوده دوران پارامترهای مهمی هستند که در تحلیل و طراحی مفاصل خمشی باید مورد توجه قرار گیرند. سفتی محوری مقدار سفتی پیچشی است که بوسیله مفصل خمشی و بصورت گشتاور بر اعضای مکانیزم وارد می‌شود. بدیهی است هر چه تغییر زاویه مفصل، نسبت به زاویه تعادل (با تغییر زاویه صفر) بیشتر باشد گشتاور بیشتری بر اعضا اعمال خواهد شد. از سوی دیگر، این مفاصل دوران محدودی دارند و نمی‌توانند همانند مفاصل سنتی دوران کامل 360° درجه‌ای داشته باشند. مقدار محدوده دوران این مفاصل به پارامترهای هندسی مفصل و جنس آن بستگی دارد. در ادامه این بخش، معادلات مربوط به سفتی محوری و محدوده دوران چندین مفصل خمشی مختلف، که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارائه خواهد شد. شکل ۲-۶ مفاصل خمشی مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶: مفصل خمشی مورد استفاده در این پژوهش [۱۱-۱۳]

برای مفصل خمشی نشان داده شده در شکل ۲-۶ الف که دارای مقطع دایره‌ای می‌باشد، رابطه سفتی محوری بصورت زیر می‌باشد [۱۱-۱۳].

$$K = (2Ebt^{5/2}) / (9\pi R^{1/2}) \quad (۱-۲)$$

که K سفتی فنر، b و t عرض و ضخامت و R شعاع است. همچنین حداکثر زاویه‌ای که مفصل موردنظر می‌تواند طی کند (θ_{max}) برابر معادله زیر خواهد بود [۱۱-۱۳].

$$\theta_{max} = \frac{\beta^2 f(\beta)}{E(1+\beta)^{9/20}} \quad (۲-۲)$$

در معادله فوق E برابر مدول الاستیک و σ_y تنش تسلیم ماده مورد استفاده می‌باشد. همچنین β که پارامتر غیر بعدی ما است، و $f(\beta)$ تابع غیر بعدی ما برابر می‌شود با [۱۱-۱۳]:

$$\beta = \frac{t}{2R} \quad (۳-۲)$$

$$f(\beta) = \frac{3\pi}{(2\beta)^{5/2}} \quad (۴-۲)$$

برای مفصل خمشی نشان داده شده در شکل ۲-۶-ب که دارای مقطع مستطیلی می‌باشد، رابطه سفتی محوری بصورت زیر می‌باشد [۱۱-۱۳].

$$K = \frac{EI}{L} \quad (۵-۲)$$

که I ممان اینرسی، و L طول نشان داده شده در شکل است. همچنین حداکثر زاویه‌ای که مفصل موردنظر می‌تواند طی کند (θ_{max}) برابر معادله زیر خواهد بود [۱۱-۱۳].

$$\theta_{max} = \frac{2L}{Et} \sigma_y \quad (۶-۲)$$

همچنین برای مفصل خمشی نشان داده شده در شکل ۲-۶-ج که هندسی متفاوت‌تری نسبت به دو مورد قبلی دارد رابطه سفتی محوری بصورت زیر می‌باشد: [۱۱-۱۳].

$$K = \left(\frac{b}{t} - 0.373 \right) \frac{4Gt^4}{6L} \quad (۷-۲)$$

در رابطه فوق G مدول برشی ماده مورد استفاده می‌باشد. همچنین حداکثر زاویه‌ای که مفصل موردنظر می‌تواند طی کند (θ_{max}) برابر معادله زیر خواهد بود [۱۱-۱۳].

$$\theta_{max} = \frac{\sigma_y}{2\sqrt{3Gt}} \frac{L}{\left(1+0.6\frac{t}{b}\right)\left(1-0.373\frac{t}{b}\right)} \quad (۸-۲)$$

در جدول ۲-۳ مشخصات چند ماده مهم، که معمولاً از آن‌ها برای تولید مفاصل نرم استفاده می‌شود، ارائه شده است. در این جدول به موادی با خصوصیات متنوع براساس نسبت پواسون، مدول برشی و مدول الاستیسیته پرداخته شده است. هر چه ماده مورد استفاده در مفصل خمشی نرم‌تر باشد، مدول الاستیک و مدول برشی دارای مقادیر پایین‌تر است، و مفصل توانایی خم شدن و تغییر زاویه بیشتری را دارد، بدون اینکه وارد ناحیه پلاستیک شده و در نهایت دچار شکست شود.

جدول ۲-۳: مشخصات چند ماده مورد استفاده در تولید مفاصل نرم

شماره	ماده	مدول الاستیک $E(Gpa)$	نسبت پواسون ν	مدول برشی $G(Gpa)$
۱	Polypropylene	۱/۴	۰/۴	۰/۵
۲	Nylon	۱/۳	۰/۴	۰/۴۶
۳	ABS plastic	۲/۸۴	۰/۳۵	۰/۹۲
۴	Aluminum 704	۷۳	۰/۳۳	۲۷/۴۴
۵	Titanium Grade 5 (Ti6Al4V)	۱۱۳	۰/۳۴	۴۹/۶۲
۶	Stainless Steel	۲۰۷	۰/۳	۷۹/۶۱

۲-۴ - کارهای پیشین در حوزه مفاصل نرم

اولین کاربرد مکانیزم‌های نرم به قرون وسطی برمی‌گردد. در آن زمان رومیان از اتصال‌ها و بخش‌های نرم برای ذخیره‌سازی انرژی در منجنیق‌ها و کمان‌های زنبوری استفاده می‌کردند. تحقیقات در زمینه طراحی مکانیزم‌های نرم که شامل انتقال حرکت نیرو و ذخیره انرژی حدوداً پنج دهه پیش آغاز شده است [۳].

اولین بحث و نشر پیوند مکانیزم‌های نرم انعطاف‌پذیر از سوی برنز^۸ و کراسلی^۹ ارائه شد [۱۴].

بیشاپ^{۱۰} و دراگر^{۱۱} موفق به پیدا کردن معادلات ریاضی به فرم بسته^{۱۲} برای تغییر شکل و انحراف تیرها با استفاده از انتگرال‌گیری بیضوی شدند [۱۵]. پس از یک وقفه طولانی میدها^{۱۳} علاقه‌مندی به مکانیزم‌های نرم را

⁸ Burns

⁹ Crossley

¹⁰ Bisshopp

¹¹ Drucker

¹² Closed form

¹³ Midha

احیا کرد، و طراحی و تجزیه تحلیل و فرآیند رسمی سازی مکانیزم های نرم را محیا کرد، و تحقیقات اولیه خود را در زمینه طراحی مکانیزم های نرم شروع کردند [۱۶].

سالامون^{۱۴} و میدها به مرور زمان متوجه بازده مکانیزم های نرم در زمینه مکانیکی شدند و مکانیزم های نرم را براساس مزیت های مکانیکی طبقه بندی کردند. نحوی^{۱۵} روش های عددی که برای تجزیه و تحلیل استاتیک و دینامیک مکانیزم های نرم استفاده می شدند را توسعه داد [۱۷].

بعدها هاول^{۱۶} و میدها و همکاران، مفهوم مدل جسم شبه صلب را برای اولین بار برای آنالیز و تحلیل مکانیزم های نرم توسعه دادند [۱۸]. سیمو^{۱۷} و پزبرگ^{۱۸} یک ترکیب دقیق هندسی از یک میله تطابق سه بعدی با اعضای صلب بدون هیچ محدودیتی بر میزان انعطاف پذیری را اجرا کردند [۱۹]. آتاناکوویچ^{۱۹} و وتیکانین^{۲۰} در سال ۱۹۹۶ معادلات دیفرانسیل جزئی را توسعه دادند، تا پاسخ دینامیکی یک تیر بدون بار را تحت فشار مدل سازی کنند [۲۰]. وانگ^{۲۱} در سال ۱۹۹۷ یک معادله دینامیکی را برای دینامیک یک مکانیزم چهارلینکی فنی با اطلاعات جانبی همراه با تغییر شکل فنر را ارائه داد [۲۱]. پانزا^{۲۲} در سال ۲۰۰۰ یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی را منتشر کرد که نشان دهنده تغییر شکل و انحراف خیز تیر یک مکانیزم نرم بود که شامل بارگذاری جرم و اثرات اصطکاک و اثر میرایی است [۲۲]. در سال ۲۰۱۶ لیو^{۲۳} و ژانگ^{۲۴} به طراحی و تحلیل مفاصل خمشی با دقت بالا پرداختند [۲۳]. فردریک^{۲۵} و لمترینگ^{۲۶} به بررسی مدل غیرخطی اوایلر-برنولی برای مکانیزم

¹⁴ Salamon

¹⁵ Nahvi

¹⁶ Howell

¹⁷ Simo

¹⁸ Posbergh

¹⁹ Atanackovic

²⁰ Cveticanin

²¹ Wang

²² Panza

²³ liu

²⁴ zhang

²⁵ Friedrich

²⁶ Lammering

های خمشی پرداختند[۲۴]. در سال ۲۰۱۷ کساندیر^{۲۷} و همکاران به هنر طراحی انواع مختلف مکانیزم‌های خمشی پرداختند[۲۵].

میو و ژائو در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار مفاصل خمشی، اتصالات تیر به ستون و تحلیل‌های آن‌ها پرداخته است، و در سال ۲۰۲۱ به تاثیر دال بتنی بر رفتار خمشی اتصال تیر به ستون و مطالعه پارامترها و فرمول‌های آن پرداخته است[۲۷،۲۶].

در سال ۲۰۱۹ ژانگ و ژائو موفق به ابداع یک مفصل فضایی نوظهور خمشی جدید شدند که این مفصل می‌تواند چرخش‌های فضایی بزرگ را به ترکیبی از پیچش و چرخش تجزیه کند، که در صنایع فضایی بسیار پرکاربرد است، و همچنین یک آزمایشگاه جدید برای تحلیل و بررسی و مقایسه تعیین خواص مفاصل خمشی برای استفاده در تونل‌های فلزی راه‌اندازی کردند[۲۹،۲۸].

در سال ۲۰۲۰ لی و فام به مطالعه عددی بر روی عملکرد خمشی تیر بتنی با تاندون‌های فولادی پرداختند[۳۰]. در سال ۲۰۲۱ ارکولینی و کالینانو به طراحی مجدد یک مفصل خمشی برای تولید در صنعت مبتنی بر فلزهای مختلف پرداختند که این مفصل خمشی کاربردهای زیادی در رباتیک و پزشکی دارند[۳۱]. در سال ۲۰۲۱ هان به رفتار انعطاف‌پذیری جزئیات مفصل خمشی بهبود یافته برای استفاده در عرشه پل پرداخت[۳۲]. در سال ۲۰۲۱ دینگ و همکاران به بررسی رفتار مفاصل خمشی دارای دو ردیف پیچ به صورت تجربی پرداختند[۳۳].

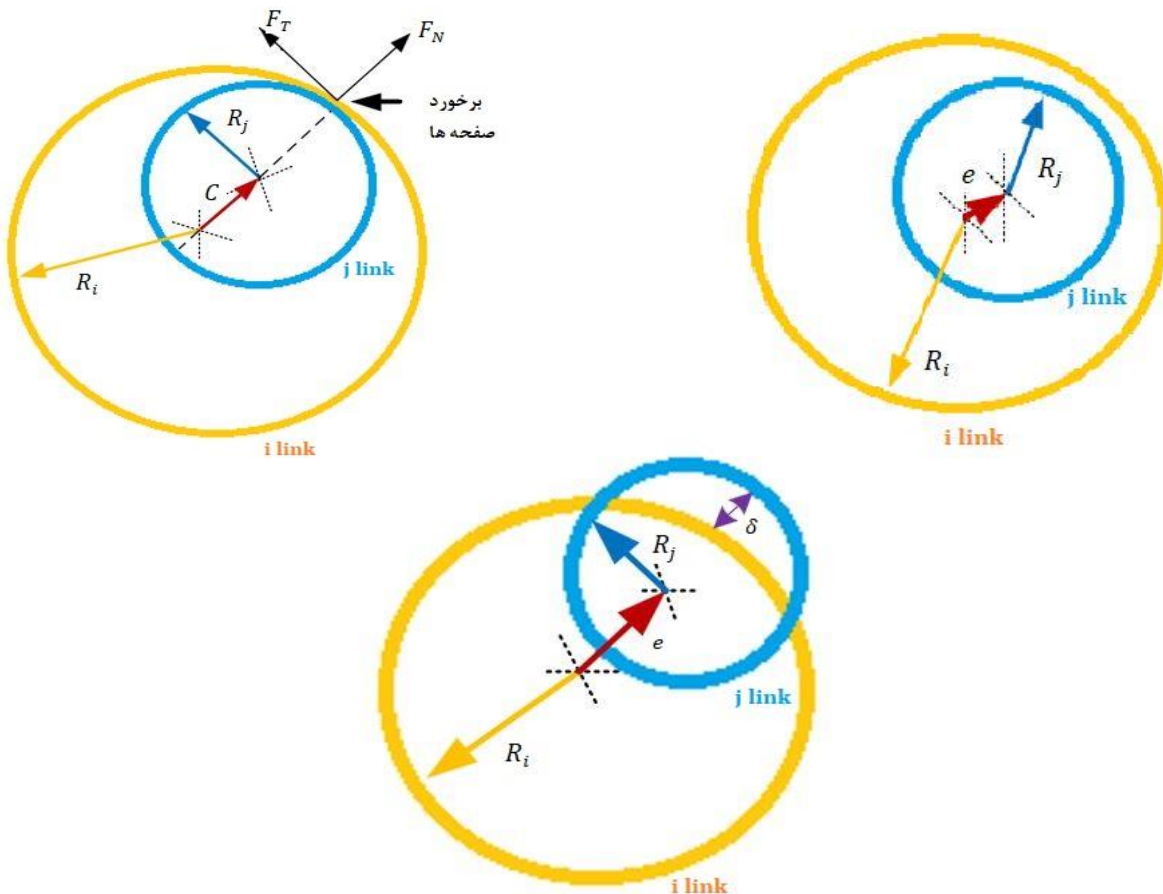
²⁷ cosandier

فصل سوم

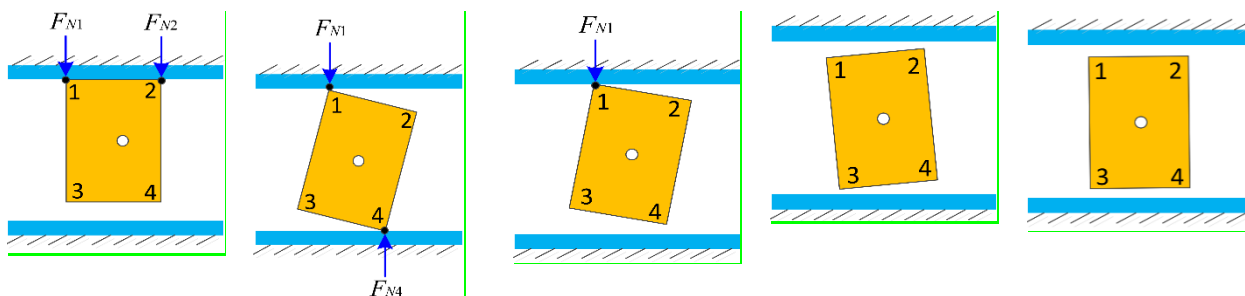
لقى و اثرات آن

۳-۱- تعریف لقی و انواع آن

مکانیزم‌های متداول (سنتی) معمولاً از مفاصل لولایی و کشویی متداول استفاده می‌کرده‌اند، که در آن‌ها سطوحی بر روی یکدیگر می‌لغزند. یکی از عوامل تاثیرگذار در کارایی این مفاصل، وجود لقی است. از طرفی وجود لقی بین سطوح امری ضروری برای ایجاد حرکت است، و از طرف دیگر وجود این عامل موجب پیدایش مشکلاتی نیز می‌شود. شکل ۳-۱ وجود لقی در مفاصل صفحه‌ای لولایی و کشویی و مدهای مختلف حرکتی آن را نشان می‌دهد.



الف) مفصل لولایی دارای لقی [۳۴]



(ب) مفصل کشویی دارای لقی [۳۵]

شکل ۳-۱: وجود لقی در مفاصل لولایی و کشویی صفحه‌ای

اثرات نامطلوب لقی مفاصل را می‌توان به دو بخش سینماتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی نمود. از نظر سینماتیکی، وجود لقی در مفاصل موجب کاهش دقت مکانیزم خواهد شد. معمولاً در محاسبات و طراحی‌های سینماتیکی از عواملی همچون لقی صرف‌نظر می‌شود، اما وجود آن در واقعیت موجب ایجاد خطا می‌شود. از سوی دیگر، وجود لقی و افزایش مقدار آن در طی کارکرد مکانیزم، اثرات مهمی بر پارامترهای دینامیکی مکانیزم خواهد داشت. افزایش ناگهانی شتاب‌ها و نیروها در حین برخورد بین سطوح در محل مفصل لقی یکی از این اثرات است. همچنین می‌توان به افزایش ارتعاش در مکانیزم، ایجاد صدا، سایش و خوردگی سطوح و استهلاک زود هنگام تکیه‌گاه‌ها نیز اشاره کرد.

با توجه به موضوع این پژوهش که مرتبط با مفاصل لولایی است، در ادامه توضیح بیشتری در مورد جزئیات حرکت سطوح درگیر نسبت به یکدیگر ارائه خواهد شد. در مفصل لولایی، می‌توان حرکات سطوح درگیر، حرکت پین در داخل یاتاقان، را در سه مد مختلف تعریف نمود:

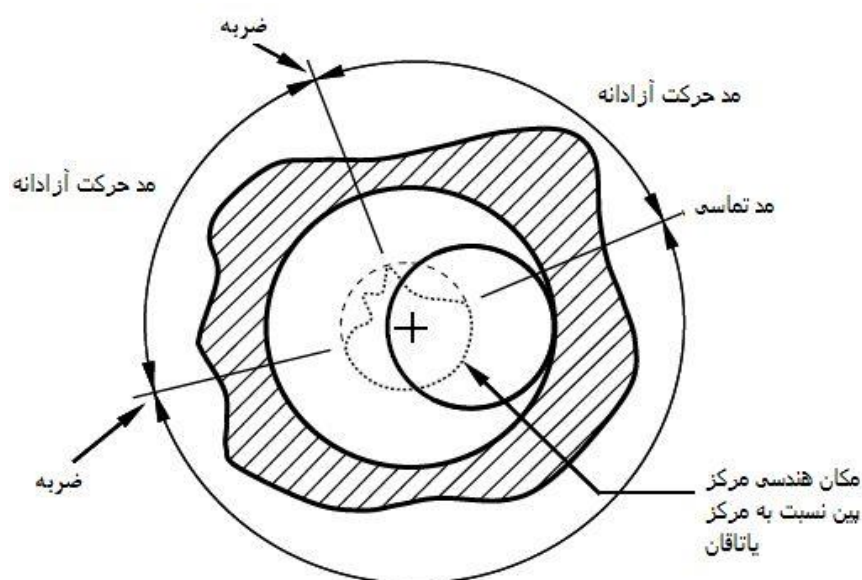
- مد تماسی^{۲۸}: در مد تماسی صفحات دو عضو در تماس دائم با یکدیگر هستند، و یک حرکت لغزشی نسبت به هم دارند.

²⁸ Contact mode

- مد حرکت آزادانه^{۲۹}: در مد حرکت آزادانه عضو داخلی که در اینجا پین است می‌تواند به‌طور آزادانه در داخل یاتاقان حرکت نماید، بگونه‌ای که بین این دو عضو هیچ‌گونه تماسی صورت نمی‌گیرد و هیچ نیرویی تولید نمی‌شود، در نتیجه در این حالت نیروی تماسی برابر صفر خواهد بود.

- مد ضربه^{۳۰}: در مد ضربه، که در پایان مد حرکت آزادانه ایجاد می‌شود، دو سطح به هم برخورد کرده و نیروی ضربه‌ای بالایی تولید می‌شود.

شکل ۲-۳ انواع مدهای حرکتی پین در داخل یاتاقان را نمایش می‌دهد [۳۶، ۳۴].



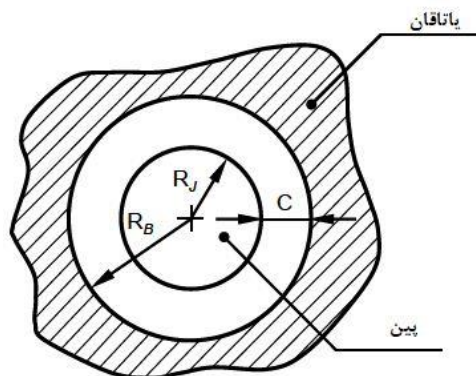
شکل ۲-۳: انواع مدهای حرکتی در مفصل دورانی دارای لقی [۳۶].

۲-۳- معادلات حاکم بر مفصل لولایی لق

²⁹ Free flight mode

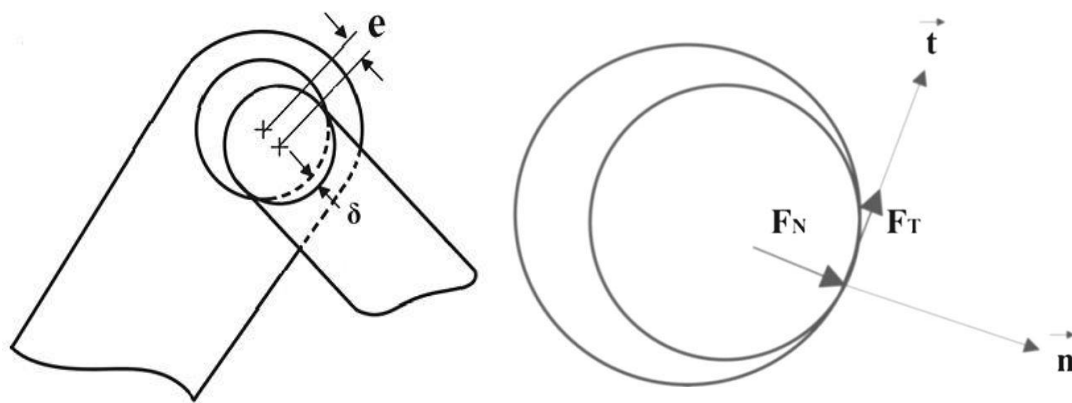
³⁰ Impact mode

شکل ۳-۳ مفصل دورانی دارای لقی، که از تماس دو سطح به نام‌های پین^{۳۱} و یاتاقان^{۳۲} تشکیل شده است، را نشان می‌دهد. در این شکل R_B و R_J به ترتیب شعاع پین و شعاع یاتاقان هستند و C اختلاف شعاع میان پین و یاتاقان و در واقع همان مقدار لقی در مفصل موردنظر است.



شکل ۳-۳: مفصل دورانی دارای لقی [۳۶].

در مد تماسی و همچنین در مد ضربه، نیروهای عمل و عکس‌العمل در محل تماس بین دو عضو ایجاد می‌شود. این نیروها، که در شکل ۳-۴-الف نشان داده شده‌اند، از دو مؤلفه نیروی نرمال F_N و نیروی مماسی F_T تشکیل شده است. در حالت کلی نیروی تماسی بین عضو را می‌توان بصورت فرمول ۳-۱ در نظر گرفت [۳۸، ۳۷].



الف) نیروهای تماسی در مفصل لقی ب) تورفتگی دو عضو نسبت به هم
شکل ۳-۴: مفصل لولایی دارای لقی و نیروهای تماسی آن [۳۸].

³¹ Journal

³² Bearing

$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } \delta < 0 \\ F_N + F_T & \text{if } \delta \geq 0 \end{cases} \quad (۱-۳)$$

که δ مقدار تورفتگی دو عضو نسبت به هم است که در شکل ۳-۴-ب نشان داده شده و رابطه آن بصورت معادله ۳-۲ است [۳۷]:

$$\delta = e - c \quad (۲-۳)$$

که e مقدار فاصله میان مراکز سطوح (شکل ۳-۴-ب) و c مقدار لقی مفصل (شکل ۳-۳) است. اگر ΔX و ΔY به ترتیب برابر فاصله افقی و فاصله عمودی میان مراکز سطوح پین و یاتاقان باشند، آن گاه e برابر است با [۳۷]:

$$e = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (۳-۳)$$

در اینجا برای محاسبه اندازه نیروی تماسی از معادله ۳-۴، که توسط لنکرانی و نیکروش ارائه شده [۳۷] استفاده می شود. در این رابطه، که علاوه بر نیروی کشسانی (الاستیک) شامل اثر میرایی (دمپینگ) نیز می باشد، فرض می شود که ابعاد ناحیه تماسی بین سطوح بسیار ناچیز و کمتر از شعاع آن ها باشد [۳۷].

$$F = K\delta^n + D\dot{\delta} \quad (۴-۳)$$

که $K\delta^n$ نیروی الاستیک براساس قانون هرتز و $D\dot{\delta}$ نیروی دمپینگ می باشد. توان n براساس ماده مورد استفاده در صفحات (که در صفحات فلزی برابر ۱/۵ است) تعیین می شود. همچنین D ضریب دمپینگ، $\dot{\delta}$ سرعت نسبی ضربه و K ضریب سفتی است [۳۷].

ضریب سفتی K نیز به هندسه صفحات و خواص فیزیکی آن ها بستگی دارد و برای اعضا با شعاع های R_i و R_j بصورت معادله ۳-۵ محاسبه می شود [۳۷].

$$K = \frac{4}{3(\delta_i + \delta_j)} \sqrt{\frac{R_i R_j}{R_i + R_j}} \quad (۵-۳)$$

در رابطه فوق δ_i و δ_j تابع جنس ماده بوده و برابرند با [۳۷]:

$$\delta_{i,j} = \frac{1-\vartheta_k^2}{E_k} \quad k = i, j \quad (6-3)$$

که ϑ و E نیز بترتیب ضریب پواسون و مدول الاستیک مربوط به مواد مورد استفاده در پین و یاتاقان هستند.

ضریب دمپینگ D نیز براساس معادلات ۷-۳ و ۸-۳ محاسبه می‌شود [۳۷].

$$D = \chi \delta^n \quad (7-3)$$

$$\chi = \frac{3K(1-c_e^2)}{4\dot{\delta}^{(-)}} \quad (8-3)$$

که $\dot{\delta}^{(-)}$ سرعت ضربه‌ای اولیه و c_e ضریب ارتجاعی است [۳۷].

با جای‌گذاری روابط فوق در معادله ۴-۳، نیروی تماسی نرمال بصورت زیر خواهد بود:

$$F_N = K\delta^n \left(1 + \frac{3(1-c_e^2)}{4} \frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}^{(-)}} \right) \quad (9-3)$$

پژوهشگران زیادی از معادله ۹-۳ برای مدل‌سازی نیروی تماسی در مفاصل لق استفاده کردند نه تنها به دلیل سادگی رابطه، بلکه تلف شدن انرژی در حین ضربه را نیز مدنظر قرار داده است [۳۷].

در معادلات زیر آمبروزیو^{۳۳} [۳۷] تغییراتی را در قانون اصطکاک کولومب برای به‌دست آوردن نیروی مماسی F_T ارائه کرده است:

$$F_T = -c_d c_f F_N \frac{v_T}{|v_T|} \quad (10-3)$$

$$c_d = \begin{cases} 0 & |v_T| < v_0 \\ \frac{|v_T| - v_0}{v_1 - v_0} & v_0 \leq |v_T| \leq v_1 \\ 1 & |v_T| > v_1 \end{cases} \quad (11-3)$$

³³ Ambrósio

که c_f ضریب اصطکاک و c_d ضریب اصلاح دینامیکی است، و v_0 و v_1 بازه سرعت مماسی هستند [۳۷].

با توجه به روابط فوق، در حالتی که دو سطح با هم در تماس هستند، نیروی تماسی Q_c و زاویه آن ψ بصورت زیر خواهد بود و در حالت عدم تماس، نیروی Q_c برابر صفر خواهد بود [۳۷].

$$Q_c = K_{eq} \delta^{\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{3(1-c_f^2)}{4} \frac{\dot{r}}{\dot{r}^{(-)}} \right), \quad \theta_2 = \alpha + \theta_3 \quad (۱۲-۳)$$

$$K_{eq} = \sqrt{1 + c_f^2 + c_d^2} K \quad (۱۳-۳)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(c_f c_d \frac{r\dot{\alpha} + R_J \omega_J - R_B \omega_B}{|r\dot{\alpha} + R_J \omega_J - R_B \omega_B|} \right) \quad (۱۴-۳)$$

در روابط فوق ω_J و ω_B سرعت‌های زاویه‌ای دو عضو در حال تماس، یعنی پین و یاتاقان هستند [۳۷].

۳-۳- کارهای پیشین در حوزه‌ی لقی

در مورد اثرات لقی مفاصل، در سال‌های اخیر کارهای مختلفی انجام شده است. در سال ۱۹۷۰ کلتهکار^{۳۴} و یانیک^{۳۵} اثر پرش در مفصل را در مکانیزم تولیدتابع بررسی نمودند [۳۹] و پس از آن دابوسکی^{۳۶} و فردونشیتاین^{۳۷} به پیش‌بینی پاسخ دینامیکی مکانیزم دارای مفصل لق پرداختند [۴۰]. در واقع این دو پژوهش، اولین جرقه‌های

³⁴ Kolhatkar

³⁵ Yajnik

³⁶ Dubowsky

³⁷ Freudenstein

بررسی لقی در مفاصل بوده‌اند. در سال ۱۹۹۰، لنکرانی و نیک‌روش مدل جدید و ماندگاری را براساس تئوری هرتز، برای نیروی تماسی در محل مفصل لق ارائه کردند [۴۱].

اینوستی، اثر لقی مفصل را با استفاده از قانون کار مجازی در مکانیزم‌های فضایی تعیین کرد [۴۲]. ونانزی و پرنیتی‌کستلی روش جدیدی را برای اثر سینماتیکی لقی مفصل روی انحراف در جای‌گذاری و چرخش عضوهای مکانیزم‌های فضایی پیشنهاد دادند و این تکنیک نیز بر مبنای اصل کار مجازی بوده و در آن اندازه لقی مفصل بسیار ناچیز در نظر گرفته شده است [۴۳]. واردی و همکارانش در کارهای خود با بهینه‌سازی دینامیکی مکانیزم‌های صفحه‌ای به کاهش اثرات لقی مفصل پرداخته‌اند. [۴۴، ۳۸، ۳۷]. اخیرا ارکایا، در کار خود با در نظر گرفتن هر دو نوع مفصل لق و مفصل خمشی به بررسی میزان مصرف انرژی در محرک ورودی براساس نوع مفصل خمشی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته است [۴۵].

۳-۴- معادله حرکت مکانیزم لنگ و لغزنده

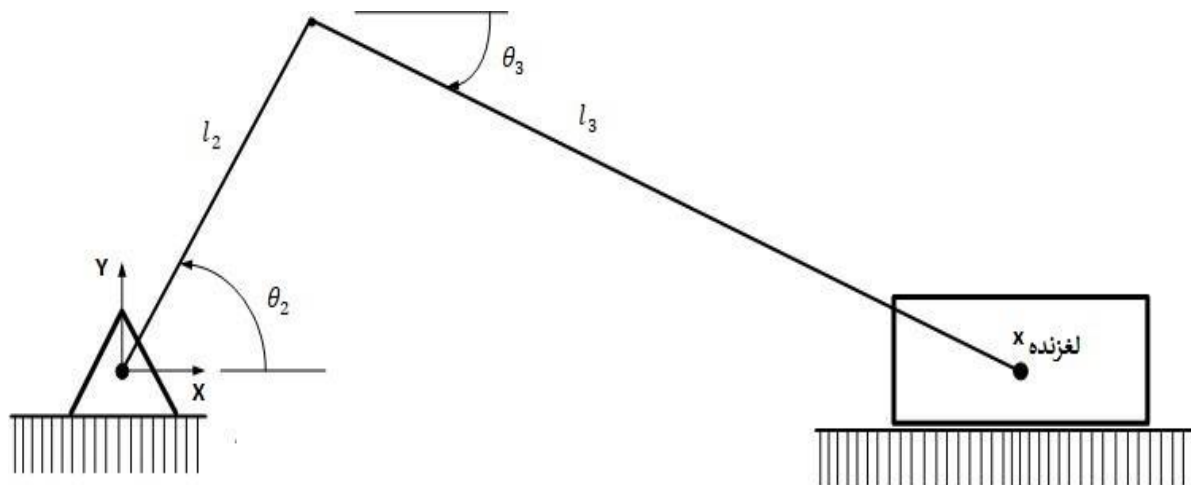
۳-۴-۱- مکانیزم لنگ و لغزنده ایده‌آل

در شکل ۳-۵ مکانیزم لنگ و لغزنده ایده‌آل (با عضوهای صلب و مفاصل لولایی متداول) نشان داده شده است که در آن، برای محاسبه جابجایی لغزنده می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۴۶]:

$$x = l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3) \quad (3-15)$$

که l_2 و l_3 به ترتیب طول لینک‌های ۲ و ۳ و θ_2 و θ_3 به ترتیب زوایای این دو لینک نسبت به محور افقی هستند. همچنین x جابجایی لغزنده را نسبت به مبدا مختصات نشان می‌دهد. θ_3 تابعی از θ_2 است و می‌توان در رابطه فوق، آن را حذف نمود. برای این کار خواهیم داشت [۴۶]:

$$l_2 \sin(\theta_2) = l_3 \sin(\theta_3) \quad (۱۶-۳)$$



شکل ۳-۵: مکانیزم لنگ و لغزنده

$$\sin(\theta_3) = \frac{l_2}{l_3} \sin(\theta_2) \quad (۱۷-۳)$$

$$\cos^2(\theta_3) = 1 - \sin^2(\theta_3) = 1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)^2 \sin^2(\theta_2) \quad (۱۸-۳)$$

$$\cos(\theta_3) = \sqrt{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)^2 \sin^2(\theta_2)} \quad (۱۹-۳)$$

با استفاده از روابط فوق، معادله ۱۵-۳ بصورت زیر بازنویسی خواهد شد، بگونه‌ای که فقط تابعی از θ_2 و طول

لینک‌ها باشد [۴۶]:

$$x = l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \sqrt{1 - \left(\frac{l_2}{l_3}\right)^2 \sin^2(\theta_2)} \quad (۲۰-۳)$$

برای حل روابط دینامیکی مکانیزم لنگ و لغزنده ایده‌آل می‌توان از روش نیوتون استفاده کرد، برای لینک شماره

دوم بدینگونه است [۴۶]:

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 a_{G_2x}$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 a_{G_2y} \quad (۲۱-۳)$$

$$T_{12} + (R_{12x} F_{12y} - R_{12y} F_{12x}) + (R_{32x} F_{32y} - R_{32y} F_{32x}) = I_{G_2} \alpha_2$$

که F نیروی وارده است، و جرم را با m نشان می‌دهیم، و a شتاب مرکز جرم است، I اینرسی است،

و برای لینک شماره ۳ بدینگونه است [۴۶].

$$F_{43x} - F_{32x} = m_3 a_{G_{3x}}$$

$$F_{43y} - F_{32y} = m_3 a_{G_{3y}}$$

$$T_{12} + (R_{43x} F_{12y} - R_{12y} F_{12x}) + (R_{32x} F_{32y} - R_{32y} F_{32x}) = I_{G_2} \alpha_2 \quad (22-3)$$

$$F_{14x} - F_{43x} + F_{P_x} = m_4 a_{G_{4x}}$$

$$F_{14y} - F_{43y} + F_{P_y} = m_4 a_{G_{4y}} \quad (23-3)$$

$$(R_{14x} F_{14y} - R_{14y} F_{14x}) - (R_{34x} F_{43y} - R_{34y} F_{43x}) + (R_{P_x} F_{P_y} - R_{P_y} F_{P_x}) = I_{G_4} \alpha_4$$

که F_P نیروی خارجی در آن وجود ندارد و آن را برای لینک ۳ صفر در نظر می‌گیریم [۴۶]:

$$\alpha_4 = 0, \quad a_{G_{4y}} = 0 \quad (24-3)$$

نیروی اصطکاک را با توجه به رابطه‌ی زیر تعریف می‌کنیم [۴۶]:

$$f = \pm \mu N, \quad F_{14x} = \pm \mu F_{14y} \quad (25-3)$$

μ ضریب اصطکاک است [۴۶].

و با جایگزینی فرمول‌های (۲۳-۳) و (۲۴-۳) رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۴۶]:

$$\pm \mu F_{14y} - F_{43x} + F_{P_x} = m_4 a_{G_{4x}}, \quad F_{14y} - F_{43y} + F_{P_y} = 0 \quad (26-3)$$

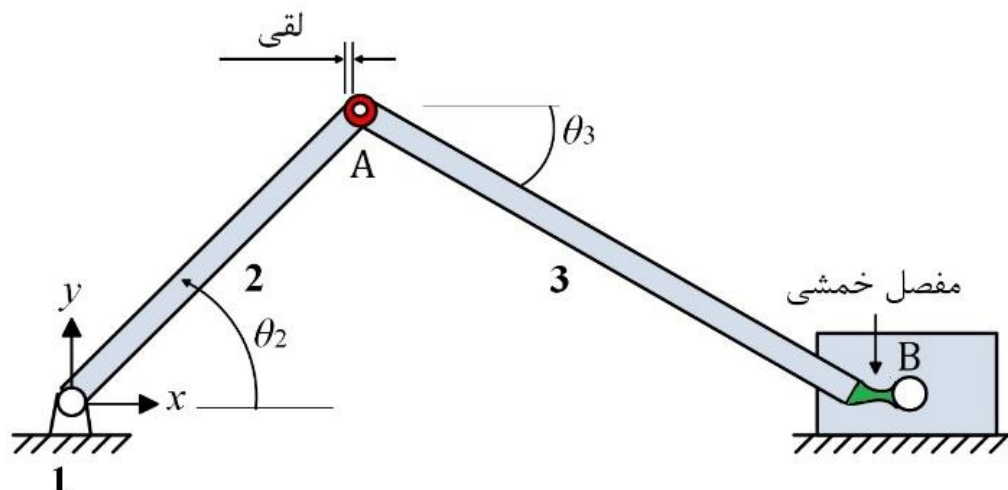
و برای اینکه این هشت تا پارامتر مجهول به دست آید ما نیاز داریم به هشت معادله، و فرمول های (۳-۲۱) و

(۳-۲۲) و (۳-۲۶) داخل ماتریس زیر نشان داده می شود [۴۶]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{12y} & R_{12x} & -R_{32y} & R_{32x} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{23y} & -R_{23x} & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & \pm\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{14y} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 a G_{2x} \\ m_2 a G_{2y} \\ I G_2 \alpha_2 \\ m_3 a G_{3x} \\ m_3 a G_{3y} \\ I G_3 \alpha_3 \\ m_4 a G_{4x} - F_{Px} \\ -F_{Py} \end{bmatrix} \quad (۳-۲۷)$$

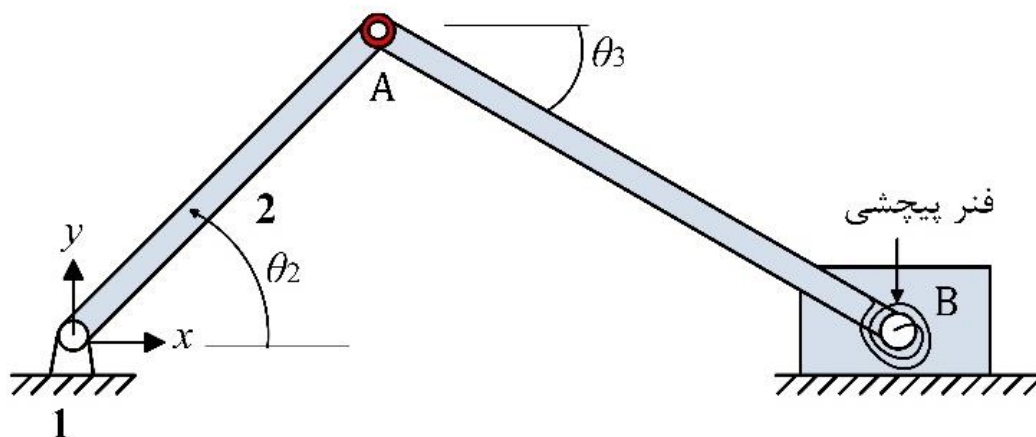
۳-۴-۲- مکانیزم لنگ و لغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی

همان طور که قبلا بیان شد، هدف این پژوهش کاهش اثرات نامطلوب لقی مفصل با استفاده از مفاصل خمشی است. بنابراین در مکانیزم لنگ و لغزنده، مفصل بین لینک های ۲ و ۳ را دارای لقی فرض کرده و مفصل بین لینک ۳ و لغزنده نیز بصورت مفصل خمشی در نظر گرفته می شود. شکل ۳-۶ مکانیزم لنگ و لغزنده مفروض را نشان می دهد.



شکل ۳-۶: مکانیزم لنگ و لغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی

وجود لقی در مفصل لولایی می‌تواند موجب افزایش شتاب‌ها و نیروهای مکانیزم شود، اما در این پژوهش سعی می‌شود با استفاده از اثرات ذاتی مفصل خمشی، که افزایش سفتی مکانیزم از جمله آن‌هاست، از این اثرات نامطلوب لقی مفصل کاسته شود. با توجه به توضیحات ارائه شده در فصول قبلی، برای مدل‌سازی مفصل خمشی می‌توان از مدل PRBM استفاده نمود. در استفاده از این مدل، مفصل موردنظر را می‌توان با استفاده از یک فنر پیچشی جایگزین نمود. در نتیجه مکانیزم موردنظر را می‌توان بصورت شکل ۳-۷ در نظر گرفت.



شکل ۳-۷: استفاده از مدل PRBM در مفصل خمشی مکانیزم لنگ و لغزنده

برای حل دینامیک این مکانیزم و بدست آوردن معادلات حرکت، می توان از روش لاگرانژ و معادله زیر بهره برد [۳۷]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial U}{\partial q_j} = Q_j, \quad j = 1, 2, \dots \quad (28-3)$$

که در این رابطه U ، T و Q_j به ترتیب انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و نیروی تعمیم یافته بوده و بصورت زیر قابل تعریف هستند [۳۷]:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^4 I_i \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^4 m_i (\dot{x}_{Gi}^2 + \dot{y}_{Gi}^2) \quad (29-3)$$

$$U = \sum_{i=2}^4 m_i g y_{Gi} \quad (30-3)$$

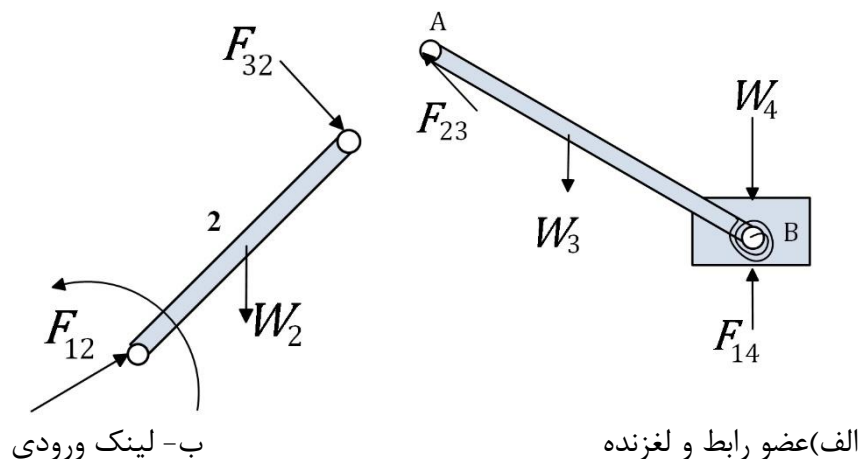
$$Q_j = \sum_{i=1}^3 \left(\mathbf{F}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_{Fi}}{\partial \dot{q}_j} + \mathbf{M}_i \cdot \frac{\partial \dot{\theta}_i}{\partial \dot{q}_j} \right) \quad (31-3)$$

در روابط فوق، q_j معرف یکی از پارامترهای مستقل سیستم است و m_i ، I_i به ترتیب جرم و ممان اینرسی عضو i ام و می باشند. همچنین g شتاب جاذبه است و $\mathbf{F}_i$ و $\mathbf{M}_i$ به ترتیب نیرو و گشتاور خارجی وارده بر هر یک از اعضا و $\mathbf{r}_{Fi}$ مکان اعمال نیروی خارجی می باشد. همچنین مولفه قائم موقعیت مرکز جرم عضو i ام، $\dot{x}_{Gi}$ و $\dot{y}_{Gi}$ مولفه های سرعت مرکز جرم عضوهای مکانیزم و $\dot{\theta}_i$ سرعت زاویه ای اعضا هستند [۳۷].

برای استفاده از معادلات لاگرانژ، در ابتدا مکانیزم از محل مفصل لق جدا شده و به دو قسمت تقسیم می شود و سپس معادلات مربوط به هر قسمت بطور جداگانه بدست می آید. شکل ۳-۸ دیاگرام آزاد این دو قسمت را نشان می دهد. با توجه به شکل، $\mathbf{F}_{23}$ نیرویی است که عضو ورودی شماره ۲ به عضو رابط شماره ۳ در محل مفصل لق

وارد می‌کند و در نتیجه، براساس قانون سوم نیوتون، عکس این نیرو به لینک ورودی وارد می‌شود. با توجه به محاسبه نیرو در مفصل لق در بخش‌های قبلی، این نیرو را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت [۳۷]:

$$\mathbf{F}_{23} = -\mathbf{F}_{32} = \begin{bmatrix} Q_A \cos \psi_A \\ Q_A \sin \psi_A \end{bmatrix} \quad (۳۲-۳)$$



شکل ۳-۸: دیاگرام آزاد اعضای مختلف مکانیزم

مکانیزم لنگ و لغزنده دارای یک درجه آزادی است، اما وجود یک مفصل لق ۲ درجه آزادی به آن می‌افزاید. بنابراین برای استخراج معادلات حرکت با استفاده از روش لاگرانژ به ۳ پارامتر مستقل نیاز است که θ_2 ، θ_3 و x_4 بدین منظور انتخاب می‌شوند. بنابراین در معادله مربوط به لینک ورودی، متغیر θ_2 به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته خواهد شد. زیرا با اطلاع از θ_2 ، وضعیت لینک مشخص خواهد شد. برای عضو رابط و لغزنده نیز که با مفصل خمشی به هم متصل شده‌اند، θ_3 و x_4 به عنوان پارامترهای مستقل انتخاب می‌شوند. اکنون، با استفاده از معادله لاگرانژ، روابط حرکتی مکانیزم برای هر یک از اعضا استخراج خواهند شد.

برای لینک ورودی مکانیزم، انرژی جنبشی و پتانسیل بصورت زیر است [۳۷]:

$$T = \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 (0.5 L_2 \dot{\theta}_2)^2, \quad (۳۳-۳)$$

$$U = 0.5 m_2 g L_2 \sin(\theta_2)$$

توجه شود که در روابط فوق و در کل مکانیزم، مرکز جرم اعضا در وسط فرض شده است. با قراردادن روابط فوق در معادله لاگرانژ، و در نظر گرفتن θ_2 به عنوان پارامتر مستقل، معادله حرکت برای عضو ورودی بصورت زیر خواهد بود [۳۷]:

$$(I_2 + 0.25m_2L_2^2)\ddot{\theta}_2 + 0.5m_2gL_2 \cos(\theta_2) = Q_A L_2 \sin(\theta_2 - \psi_A) + \tau_{in} \quad (۳۴-۳)$$

که τ_{in} مقدار گشتاور ورودی مکانیزم و Q_A نیز نیروی وارده از طرف مفصل لق می باشد.

برای عضوهای رابط و لغزنده نیز می توان معادلات انرژی جنبشی و پتانسیل را بصورت زیر نوشت [۳۷]:

$$T = \frac{1}{2}I_3\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}m_3V_{G3}^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{x}_4^2, \quad U = m_3gy_{G3} + \frac{1}{2}K_B\theta_3^2 \quad (۳۵-۳)$$

که K_B سفتی مفصل خمشی در محل مفصل C است.

با قراردادن هر کدام از پارامترهای θ_3 و x_4 در معادله لاگرانژ، و با استفاده از معادلات بالا، دو معادله حرکت زیر برای عضوهای رابط و لغزنده مکانیزم بدست می آیند [۳۷].

$$\begin{aligned} \left(I_3 + \frac{1}{4}m_3L_3^2\right)\ddot{\theta}_3 + \left(\frac{1}{2}m_3L_3 \sin \theta_3\right)\ddot{x}_4 - \frac{1}{2}m_3gL_3 \cos \theta_3 + K_B\theta_3 \\ = Q_A L_3 \sin(\theta_3 - \psi_A) \end{aligned} \quad (۳۶-۳)$$

$$(m_3 + m_4)\ddot{x}_4 + \left(\frac{1}{2}m_3L_3 \sin \theta_3\right)\ddot{\theta}_3 + \frac{1}{2}m_3L_3\omega_3^2 \cos \theta_3 = Q_A \cos \psi_A \quad (۳۷-۳)$$

بنابراین معادلات (۳۳-۳)، (۳۵-۳) و (۳۶-۳) به عنوان معادلات حرکت مکانیزم لنگ و لغزنده دارای مفصل لق و مفصل خمشی مورد استفاده قرار می گیرند [۳۷].

فصل چهارم

بهینه‌سازی مسئله والگوریتم‌ها

۴-۱- مسئله بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی در این پژوهش استخراج هندسه و جنس بهینه برای مفاصل خمشی مورد استفاده می‌باشد، بگونه‌ای که بتوانند بیشترین کاهش را در مقادیر بیشینه شتاب اعضا ایجاد کنند. مفاصل خمشی مورد استفاده شده در این پژوهش سه موردی هستند که در شکل ۶-۲ نشان داده شده‌اند و معادلات مربوط به محدوده زاویه-ای و سفتی آن‌ها نیز در فصل دوم ارایه شده است. در واقع با توجه به هندسه و جنس انتخابی برای مفصل خمشی موردنظر، محدوده زاویه‌ای مجاز مفصل طراحی شده باید از مقدار تغییر زاویه مفصل موردنظر در مکانیزم بیشتر باشد تا موجب ورود به ناحیه پلاستیک و تغییر شکل نامتعارف و در نهایت شکست مفصل خمشی نشود.

برای مفصل شماره ۱ که در شکل ۶-۲ الف نشان داده شده است، متغیرهای طراحی عبارتند از:

- E مدول الاستیک (که معرف جنس مفصل می‌باشد)
- t ضخامت مقطع موردنظر
- b عرض مفصل
- R شعاع مقطع

برای مفصل خمشی شماره ۲ نیز متغیرهای طراحی براساس شکل ۶-۲ ب بصورت زیر هستند:

- E مدول الاستیک (که معرف جنس مفصل می‌باشد)
- t ضخامت مقطع موردنظر
- b عرض مفصل
- L طول مقطع موردنظر

و در نهایت شکل ۶-۲ ج نشان‌دهنده مفصل شماره ۳ است که از نظر ساختاری با دوتای قبلی متفاوت است. در

این حالت نیز متغیرهای طراحی عبارتند از:

- E مدول الاستیک (که معرف جنس مفصل می‌باشد)
- t ضخامت مقطع موردنظر

- b عرض مفصل
- L طول مفصل

هدف از بهینه‌سازی در این مساله کاهش مقادیر بیشینه شتاب‌هاست. براین اساس تابع هدف مورد استفاده بصورت زیر می‌باشد:

$$F = (F_1 + F_2)/2 \quad (۱-۴)$$

که F_1 مقدار کاهش در شتاب خطی لغزنده نسبت به حالت عدم استفاده از مفصل خمشی است و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_1 = \frac{\max|\ddot{X}_{4_cl_f}|}{\max|\ddot{X}_{4_cl_i}|} \quad (۲-۴)$$

که $\ddot{X}_{4_cl_f}$ شتاب خطی لغزنده برای مکانیزم دارای مفصل لق و مفصل خمشی است و $\ddot{X}_{4_cl_i}$ نیز شتاب خطی لغزنده برای مکانیزمی با یک مفصل لق و یک مفصل ایده‌آل است.

همچنین F_2 مقدار کاهش در شتاب زاویه‌ای لینک رابط مکانیزم لنگ-لغزنده نسبت به حالت عدم استفاده از مفصل خمشی است و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_2 = \frac{\max|\ddot{\theta}_{4_cl_f}|}{\max|\ddot{\theta}_{4_cl_i}|} \quad (۳-۴)$$

که $\ddot{\theta}_{4_cl_f}$ شتاب زاویه‌ای لینک رابط برای مکانیزم دارای مفصل لق و مفصل خمشی است و $\ddot{\theta}_{4_cl_i}$ نیز شتاب زاویه‌ای عضو رابط برای مکانیزمی با یک مفصل لق و یک مفصل ایده‌آل است.

۴-۲ الگوریتم‌های بهینه‌سازی

مسائل بهینه‌سازی به جستجوی بهترین راه حل از میان تمام راه حل‌های ممکن می‌پردازند، در مسئله ما از سه الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کرده‌ایم، الگوریتم ژنتیک^{۳۸} (GA)، الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات^{۳۹} (PSO) و الگوریتم فراابتکاری ملخ^{۴۰} (GOA)، که در ادامه به تعریف این الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، معروف‌ترین و پر کاربردترین تکنیک جستجو فراابتکاری^{۴۱} برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند، این الگوریتم برای اولین بار توسط جان هالند^{۴۲} در سال ۱۹۷۰ معرفی شد، الگوریتم ژنتیک به صورت ذاتی جز الگوریتم‌های گسسته و باینری می‌باشد، ولی ساختارش به شکلی می‌باشد که، می‌تواند مسائل پیوسته را نیز حل کند.

الگوریتم ژنتیک، به طور مداوم جمعیتی از n کروموزوم را به همراه مقدار انتخاب هر کروموزوم برگزیده را حفظ می‌کند، والدین بر مبنای مقدار برگزیده برای جفت‌گیری انتخاب می‌شوند، و با استفاده از برنامه‌ای مشخص، فرزندان را ایجاد می‌کنند. در نتیجه، جواب‌هایی که برگزیده‌تر هستند، فرصت‌های بیشتری برای رقابت و صاحب فرزند شدن خواهند داشت. به این ترتیب، فرزندان می‌توانند ویژگی‌هایی از هر کدام از والدین را به ارث ببرند، با توجه به این که اندازه جمعیت همواره ثابت نگه داشته می‌شود، هم‌زمان با جفت‌گیری والدین و ایجاد فرزندان، باید برای آن‌ها جای خالی ایجاد کرد. برای این منظور، اعضای جمعیت می‌میرند و جواب‌های جدید جایگزین آن‌ها می‌شوند. به تدریج و پس از این که همه موقعیت‌های جفت‌گیری در جمعیت اولیه مورد استفاده قرار گرفت نسل جدید جایگزین نسل قبلی می‌شود. با این روش می‌توان امیدوار بود که در طی نسل‌های

³⁸ Genetic algorithm

³⁹ Particle swarm optimization

⁴⁰ Grasshopper Optimisation Algorithm

⁴¹ Metaheuristic

⁴² John Holland

متوالی، جواب های بهتر پیشرفت کنند، در حالی که جواب هایی که عملکرد ضعیف تری دارند به تدریج حذف شوند [۴۸،۴۷].

به طور متوسط، نسل های جدید جواب ها دارای ژن های خوب بیشتری نسبت به یک جواب از نسل قبلی هستند، هر نسل دارای جواب های بهتری نسبت به نسل های قبل خود خواهد بود، گفته می شود که خود الگوریتم به مجموعه ای از جواب ها برای مسئله موردنظر همگرا شده است، الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از این ایده اقدام به حل مسائل می کند، روند استفاده از الگوریتم های ژنتیک به صورت زیر می باشد [۴۸،۴۷]:

۱- معرفی جواب های مسئله به عنوان کروموزوم

۲- معرفی تابع برازندگی^{۴۳}

۳- جمع آوری اولین جمعیت^{۴۴}

۴- معرفی عملگرهای انتخاب^{۴۵}

۵- معرفی عملگرهای جهش^{۴۶}

اگر F_i تابع جمعیت ما باشد پس با فرمول زیر اشتراک (گروه) جفت شده را نشان می دهد [۴۷]:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j}; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (۴-۴)$$

و فرمول زیر میانگین تناسب جمعیت برابر است [۴۷]:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j \quad (۵-۴)$$

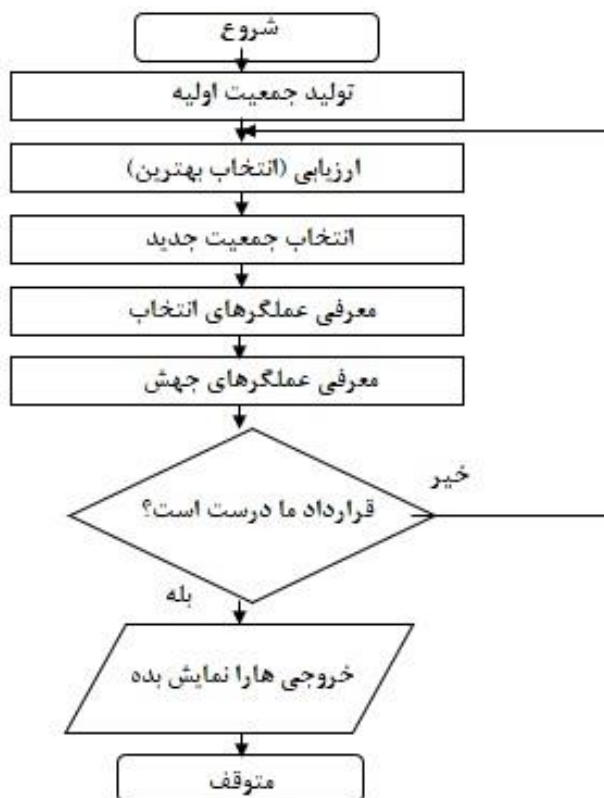
⁴³ Fittnes

⁴⁴ Selection

⁴⁵ Crossover

⁴⁶ mutation

در شکل ۴-۱ فلوچارت الگوریتم ژنتیک را می‌توان دید.



شکل ۴-۱: فلوچارت الگوریتم ژنتیک.

۴-۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات، براساس رفتار یک لانه^{۴۷} یا گروهی از حشرات، مورچه‌ها، زنبورها، موریانه‌ها و یا دسته‌ای از پرندگان است، که رفتاری اجتماعی دارند، کلمه‌ی ذره بیانگر یک زنبور در لانه است یا پرنده‌ای در یک گله است. هر فرد یا ذرات در یک گروه به روش توزیع‌شده رفتار می‌کند، استفاده از هوش خود و هوش

⁴⁷ Colony

جمعی (گروهی گروه)، به عنوان مثال اگر یک ذره راه خوبی برای غذا پیدا کند، بقیه گروه را نیز خبر خواهد کرد، زیرا تمام ذرات به سمت غذا جذب می‌شوند، حتی اگر محل آن‌ها خیلی دور از گروه باشد، می‌تواند نزدیک‌ترین مسیر را پیدا کند، روش‌های ازدحام ذرات در اصل مبتنی بر هوش جمعی (گروهی) است، الگوریتم ازدحام ذرات در اصل توسط کندی^{۴۸} و ابرهارت^{۴۹} در سال ۱۹۹۵ مورد استفاده قرار گرفت [۴۷].

هر ذره دارای دو ویژگی است، که اولین ویژگی موقعیت (که هر ذره بهترین موقعیت را پیدا کند)، و دومین ویژگی سرعت است، که ذرات موقعیت‌های مناسب را با یکدیگر (گروه) به اشتراک می‌گذارند تا موقعیت و سرعت فردی آن‌ها براساس اطلاعات دریافتی تنظیم شود [۴۷].

از این رو رفتار ازدحام ذرات ترکیبی از سه ویژگی است:

۱- انسجام (باهم بودن)

۲- جداسازی (به یکدیگر بیش از اندازه نزدیک نشوند)

۳- در صف حرکت کنند (در یک راستا) و حرکت گروهی باشد

بنابراین مدل ما براساس جست‌وجوی تصادفی در فضای طراحی برای به‌دست آوردن حداکثر (ماکزیمم) مقدار است [۳۹].

به‌عنوان مثال برای یک مسئله ماکزیمم‌ساز بدین صورت است [۴۷]:

$$\max f(x) \quad \text{with } X^l \leq X \leq X^u \quad (۴-۶)$$

که X^l باند پایین و X^u باند بالا است و سرعت از رابطه زیر بدست می‌آید [۴۷]:

$$V_j(i) = \theta V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best} - X_j(i-1)]; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (۴-۷)$$

⁴⁸ Kennedy

⁴⁹ Eberhart

که c_1 و c_2 به ترتیب عوامل شناختی نرخ‌های فردی و نرخ‌های گروهی است، که نشان‌دهنده اهمیت موقعیت می باشد و $r_1 r_2$ به ترتیب اعداد تصادفی ما در دامنه صفر و یک، $V_j(i-1)$ سرعت ذره در تکرار قبلی خودش، $X_j(i-1)$ موقعیت ذره در تکرار قبلی خودش، $P_{best,j}$ بهترین مکان قرارگیری ذره، G_{best} بهترین و بالاترین مقدار تابع هدف و θ وزن اینرسی است، که معمولاً در مسئله‌های خطی مقدار مینیمم آن 0.4 و مقدار ماکزیمم آن 0.9 است و فرمول محاسبه آن به فرم زیر است [۴۸،۴۷]:

$$\theta(i) = \theta_{max} - \left(\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{i_{max}} \right) i \quad (۸-۴)$$

اگر تابع $F(X)$ بدون قید بود، از تابع پنالتی^{۵۰} به عنوان قیدهای ما استفاده می‌کنیم، دو نوع توابع پنالتی را

می‌توان در تعریف تابع استفاده کرد [۴۸،۴۷]:

نوع اول را می‌توان که تابع پنالتی ثابت و محدود گفته می‌شود، از پارامترهای پنالتی ثابت استفاده کرد، اگرچه که مینیمم‌سازی مقدار پنالتی ما به درجه قیدها بستگی دارد.

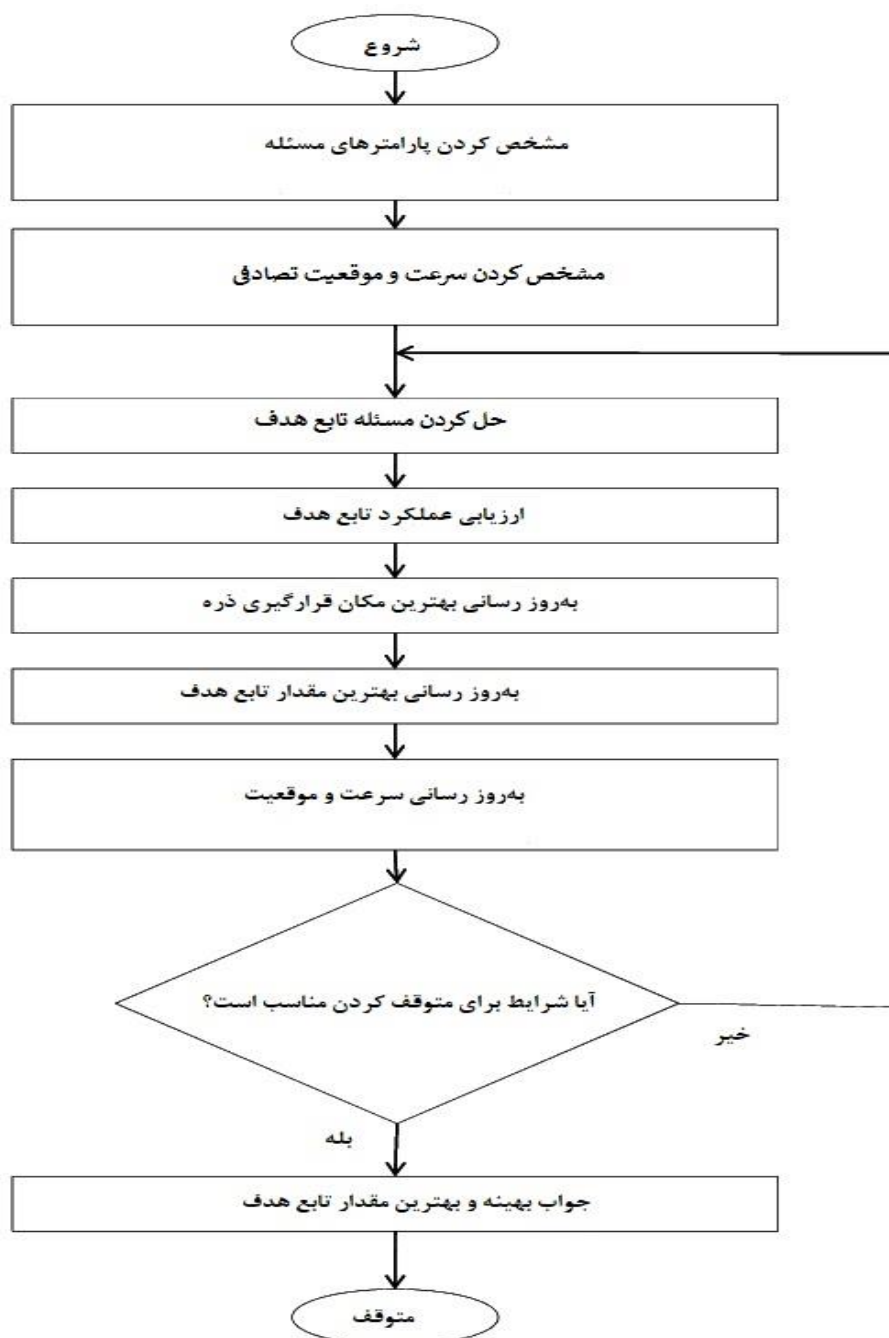
نوع دوم به عنوان تابع پنالتی غیر ثابت و غیر محدود گفته می‌شود، که از مقادیر دینامیکی تغییر پذیر در هر تکرار مختلف به عنوان پارامترهای تابع پنالتی ما استفاده می‌شود.

با توجه به تابع پنالتی غیر ثابت ما تابع $F(X)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۷]:

$$F(X) = f(x) + C(i)H(X) \quad (۹-۴)$$

که $C(i)$ نشان‌دهنده پارامتر پنالتی دینامیکی اصلاح شده (اپدیت شده) در هر تکرار مختلف و $H(X)$ فاکتور تابع پنالتی ما وابسته به قیدهای ما است و در شکل ۴-۲ فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات را می‌توان دید.

⁵⁰ Penalty function



شکل ۴-۲: فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات.

۴-۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

الگوریتم ملخ در سال ۲۰۰۷ توسط دو ایرانی میرجلیلی^{۵۱} و سارمی^{۵۲} ابداع شد، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ملخ جز تازه‌ترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است، و همانطور که از اسمش پیداست این الگوریتم از حرکات واقعی ملخ ابداع شده است، که به‌طور کلی بهینه‌سازی ملخ GOA مدل ریاضی الگوریتم پیشنهادی تقلیدی از رفتار دسته ملخ‌ها در طبیعت برای حل مسئله بهینه‌سازی می‌باشد، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر به ارائه نتایج برتر در مقایسه با الگوریتم‌های شناخته شده و اخیر است [۴۹].

ملخ از خانواده حشرات می‌باشد، آن‌ها به‌عنوان آفت شناخته می‌شوند چرا که موجب آسیب‌زدن به محصولات کشاورزی می‌شوند، اگرچه ملخ معمولاً در طبیعت بصورت تکی و جداگانه دیده می‌شود، آن‌ها در یکی از بزرگ‌ترین گروه‌ها از تمام موجودات قرار دارند، اندازه گروه‌ها ممکن است در مقیاس خیلی بزرگ و یک کابوس برای کشاورزان باشد، بزرگ‌ترین گروه ملخ‌ها که تا کنون ثبت شده، در سال ۱۸۷۵ در نبراسکا دیده شده است، که در حدود بیش از ۱۱ هزارمیلیارد ملخ بالدار در کنار هم وجود داشته‌است، مراحل زندگی ملخ را می‌توان مرحله تخم^{۵۳}، نوزادی^{۵۴}، بالغ‌شدن^{۵۵} نام برد، که در دوران نوزادی حرکت و گام‌های کوچک برداشته تا زمانی که به دوران بزرگسالی می‌رسد حرکت آن ناگهانی و با گام‌های بلند همراه است، الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت به‌صورت منطقی فرآیند جستجو را به دو بخش تقسیم می‌کنند: مرحله اکتشاف و مرحله بهره‌برداری.

در اکتشاف، عامل‌های جستجو تشویق به حرکت‌های تصادفی می‌شوند، در حالی که در مرحله بهره‌برداری آن‌ها تمایل به حرکت‌های محلی و اطراف مکان خود را دارند. این دو عمل، و همچنین جستجوی هدف، به‌طور

⁵¹ Mirjalili

⁵² Saremi

⁵³ Egg

⁵⁴ Nymph

⁵⁵ Adult

طبیعی توسط ملخ انجام میگیرد. بنابراین ، اگر ما روشی برای مدل کردن ریاضی این رفتار پیدا کنیم، می توانیم یک الگوریتم الهام گرفته از طبیعت جدید را طراحی کنیم [۴۹].

مدل ریاضی به کار گرفته شده برای شبیه سازی رفتار ملخ ها به صورت زیر می باشد [۴۹]:

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (۱۰-۴)$$

که در آن S_i تعامل اجتماعی و G_i نیروی گرانش اعمال شده است و A_i جهت باد را نمایش می دهد [۴۹].

X_i موقعیت چندمین ملخ را مشخص می کند [۴۹].

به منظور ایجاد رفتار تصادفی می توان رابطه بالا را به صورت زیر کامل کرد [۴۹]:

$$X_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 A_i \quad (۱۱-۴)$$

که r_1, r_2, r_3 اعداد تصادفی در بازه ی صفر و یک می باشند [۴۹]، و مقدار S_i از فرمول زیر محاسبه می شود [۴۹]:

$$S_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(d_{ij}) \widehat{d}_{ij} \quad (۱۲-۴)$$

که در آن d_{ij} فاصله بین دو ملخ را نشان می دهد که به صورت زیر تعریف می شود [۴۹]:

$$d_{ij} = |x_j - x_i| \quad (۱۳-۴)$$

و $\widehat{d}_{ij}$ یک بردار واحد است، که به صورت زیر تعریف می شود [۴۹]:

$$\widehat{d}_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \quad (۱۴-۴)$$

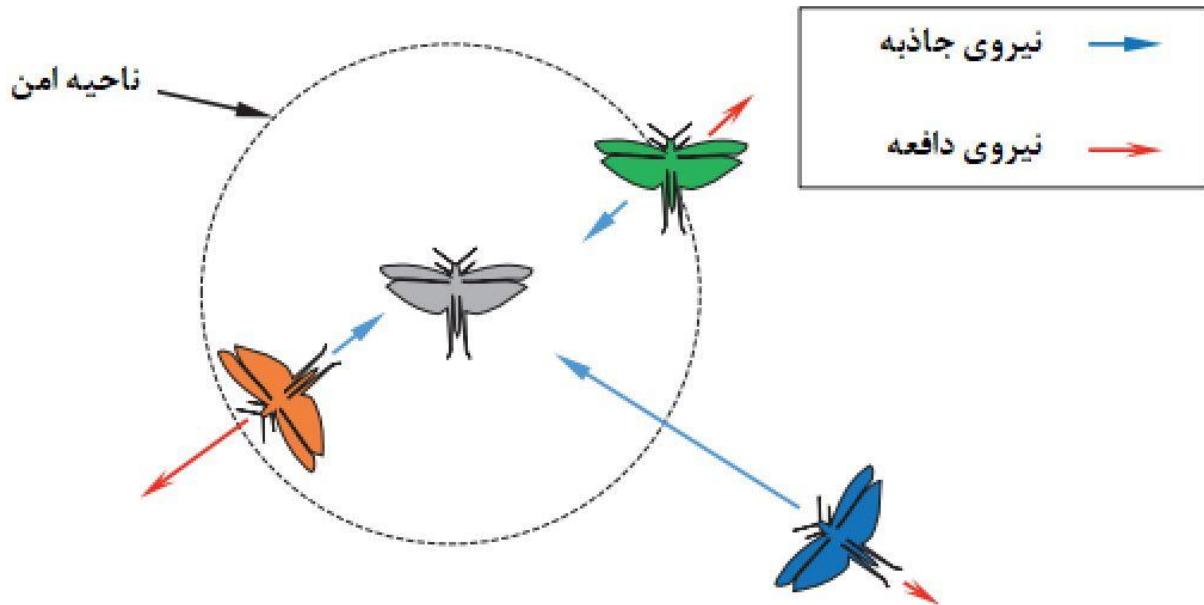
و s یک تابع برای تعریف نیروی اجتماعی می باشد که از رابطه زیر به دست می آید [۴۹]:

$$s(r) = f e^{\frac{-r}{l}} - e^{-r} \quad (۱۵-۴)$$

که f نشان دهنده شدت جاذبه، l نشان دهنده طول مقیاس جاذبه و s نشان دهنده تعداد ملخ ها نیز می باشد.

به طور کلی این دو پارامتر منطقه جاذبه و دافعه را به طور قابل توجهی تغییر می دهند، که تعامل اجتماعی را در

شکل ۳-۴ می توان مشاهده کرد [۴۹]:



شکل ۳-۴: الگوهای اصلاح شده در الگوریتم ملخ [۴۹].

مؤلفه G که نیروی گرانشی اعمال شده است، به صورت زیر تعریف می شود [۴۹]:

$$G_i = -g \hat{e}_g \quad (۱۶-۴)$$

$\hat{e}_g$ بردار واحد به سمت مرکز زمین، g ثابت گرانشی است و مؤلفه A که جهت باد را نمایش می دهد،

به صورت زیر تعریف می شود [۴۹]:

$$A_i = u \hat{e}_w \quad (۱۷-۴)$$

که u ثابت رانش و $\hat{e}_w$ بردار واحد در جهت باد است، با جایگزینی رابطه‌های (۴-۱۲)، (۴-۱۶) و (۴-۱۷) در رابطه (۴-۱۰) می‌توان موقعیت هر ملخ را به‌دست آورد [۴۹]:

$$X_i = \sum_{j=1}^N s(|x_j - x_i|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} - g\hat{e}_g + u\hat{e}_w \quad (۴-۱۸)$$

از آن‌جا که ملخ‌های نابالغ روی زمین حرکت می‌کنند، موقعیت آن‌ها نباید از یک حد آستانه کمتر شود. با این حال، نمیتوانیم از این رابطه در الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کنیم، چرا که این رابطه مانع از کاوش و بهره برداری در فضای جستجوی یک راه حل می‌شود، بنابراین رابطه‌ی (۴-۱۸)، می‌تواند تعامل بین ازدحام ملخ‌ها را شبیه‌سازی کند [۴۹].

با این حال، این مدل ریاضی را نمی‌توان بصورت مستقیم برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار داد، به دلیل اینکه ملخ‌ها به سرعت به منطقه آسایش می‌رسند، و گروه به یک نقطه مشخص همگرا نمی‌شود، یک معادله اصلاح شده از معادله (۴-۱۸) برای حل مسائل بهینه‌سازی بصورت زیر که معادله (۴-۱۹) است، ارائه شده است [۴۹]:

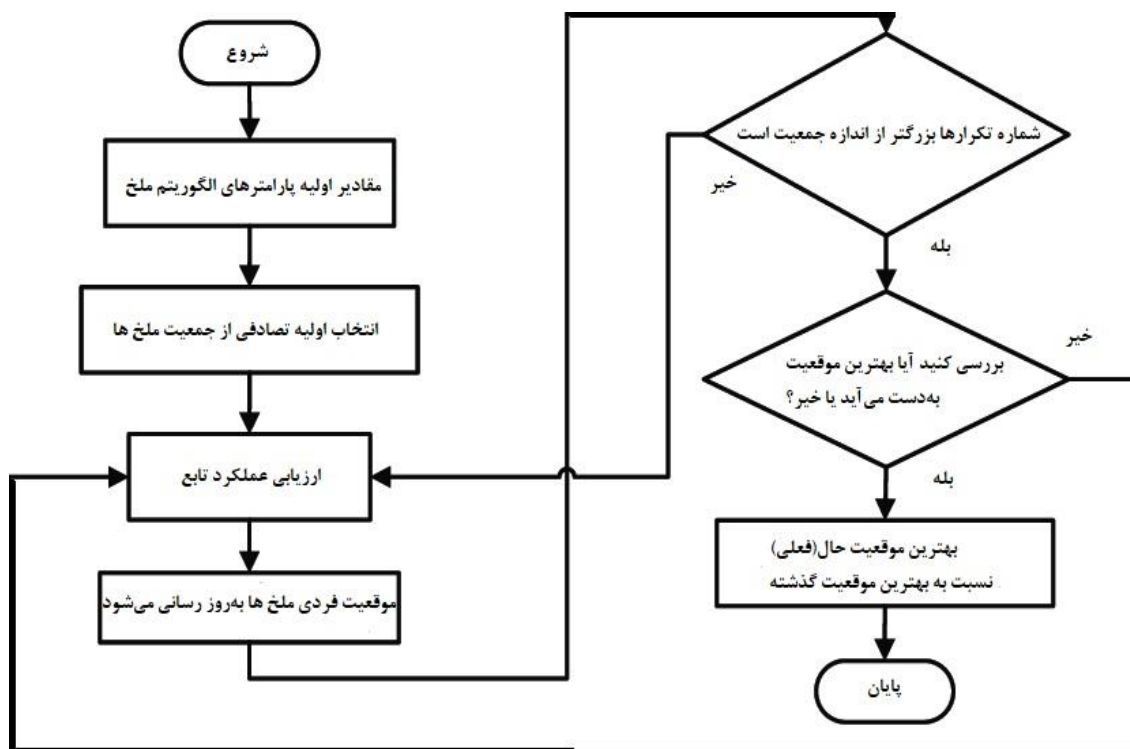
$$X_d^i = c \left(\sum_{j=1}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (۴-۱۹)$$

ثابت کاهش برای کم کردن منطقه امن c مقدار بعد (بهترین جواب) و $\hat{T}_d$ حد پایین، lb_d حد بالا، ub_d که (دافعه و جاذبه) می‌باشد [۴۹].

معادله (۴-۱۹) نشان می‌دهد موقعیت بعدی یک ملخ براساس موقعیت فعلی آن، موقعیت هدف، و موقعیت همه ملخ‌های دیگر تعریف می‌شود [۴۹].

در روش ازدحام ذرات، دو بردار برای هر ذره وجود دارد: بردار موقعیت و بردار سرعت، و در الگوریتم ملخ تنها بردار موقعیت برای هر عامل وجود دارد. یک تفاوت اصلی دیگر بین این دو الگوریتم این است که روش ازدحام ذرات موقعیت ذره‌ها را براساس موقعیت فعلی، بهترین جواب شخصی (فردی)، و بهترین جواب عمومی (گروهی) به‌روزرسانی می‌کند، اما در الگوریتم ملخ موقعیت را براساس موقعیت فعلی آن، بهترین جواب عمومی (گروهی)، و موقعیت سایر ملخ‌ها به‌روزرسانی می‌کند [۴۹].

در شکل ۴-۴ فلوچارت الگوریتم ملخ را می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم ملخ

فصل پنجم

نتایج

۵-۱- مکانیزم بدون مفصل خمشی

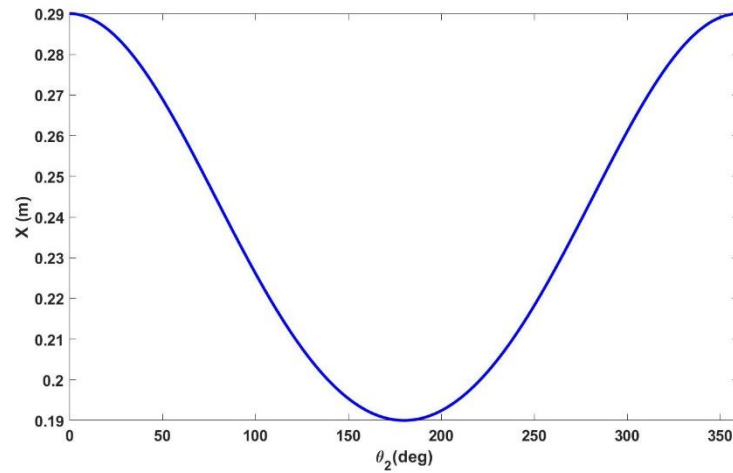
۵-۱-۱- مکانیزم ایده آل بدون مفصل لق و مفصل خمشی

در این قسمت ابتدا مکانیزم لنگ-لغزنده متداول در نظر گرفته می‌شود، بگونه‌ای که همه مفاصل آن از نوع مفاصل ایده آل (بدون لقی و بدون مفاصل خمشی) هستند. شکل ۳-۵ این مکانیزم ایده آل را نشان می‌دهد. با استفاده از روابط فصل سوم می‌توان نمودارهای سینماتیکی این مکانیزم را بدست آورد. در شکل ۵-۱ به ترتیب نمودارهای جابجایی، سرعت و شتاب لغزنده برای این مکانیزم ایده آل برحسب θ_2 رسم شده است. در ادامه و در شکل ۵-۲ نیز نمودارهای تغییر زاویه عضو رابط (عضو شماره ۳)، سرعت زاویه‌ای لینک سوم و شتاب زاویه‌ای آن برحسب θ_2 نشان شده است.

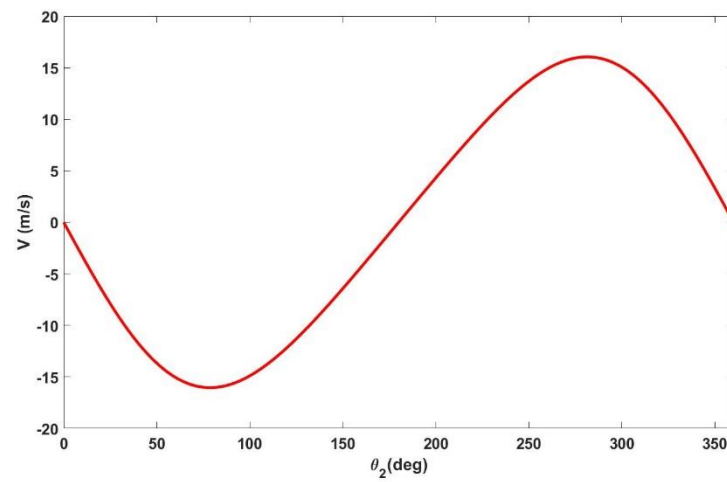
براساس این نمودارها می‌توان مقادیر بیشینه شتاب‌های خطی و زاویه‌ای را در حالت ایده آل استخراج نمود و آن‌ها را با حالت وجود لقی و وجود مفصل خمشی مقایسه نمود.

۵-۱-۲- مکانیزم دارای یک مفصل لق و بدون مفصل خمشی

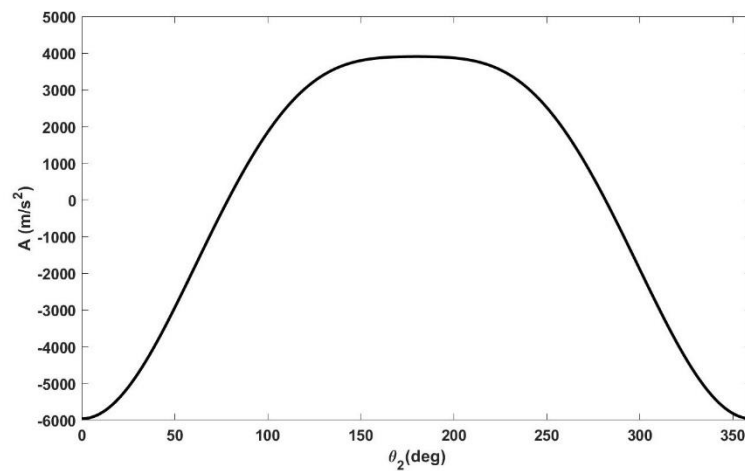
حالت دیگری که برای مقایسه نتایج موردنیاز است، حالتی است که در آن مکانیزم دارای یک مفصل لق (در مفصل بین عضو ورودی و عضو رابط) و یک مفصل ایده آل (مفصل بین عضو رابط و لغزنده) است. در شکل ۵-۳ به ترتیب نمودارهای شتاب زاویه‌ای و شتاب خطی و گشتاور لذاب این مکانیزم بر حسب زمان، و برای سه دور دوران، نشان داده شده است. همانطور که از مقادیر شتاب خطی و زاویه‌ای در شکل ۵-۳ و مقایسه آن با مقادیر شتاب شکل‌های ۵-۱ و ۵-۲ مشخص است، در صورت وجود لقی در یکی از مفاصل، مقادیر بیشینه شتاب‌ها افزایش قابل توجهی خواهند داشت.



الف- جابجایی لغزنده

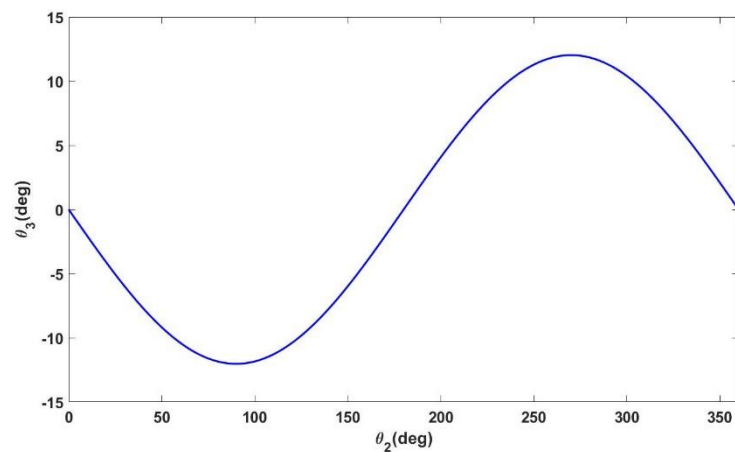


ب- سرعت لغزنده

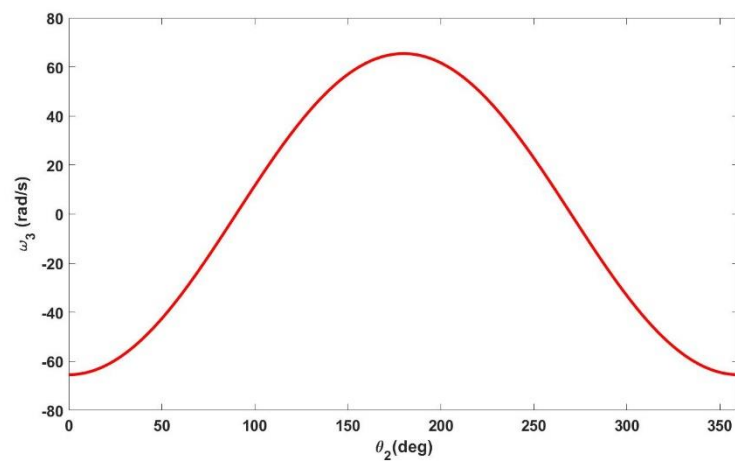


ج- شتاب لغزنده

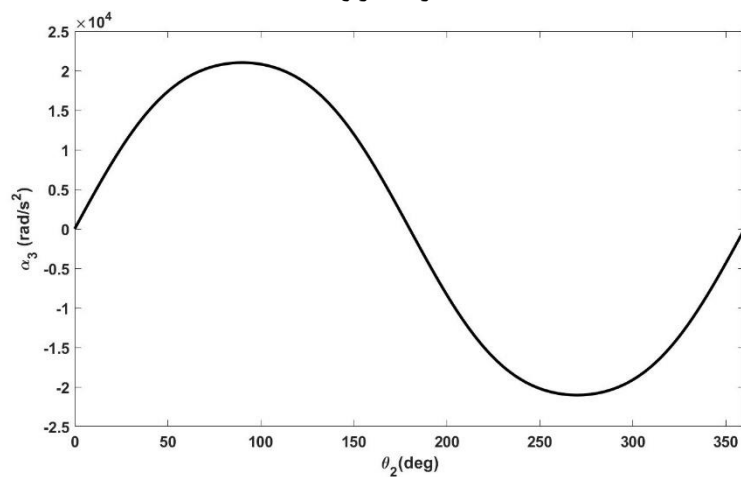
شکل ۵-۱: نمودارهای جابجایی، سرعت و شتاب لغزنده برای مکانیزم کاملاً ایده‌آل



الف- تغییر زاویه لینک ۳

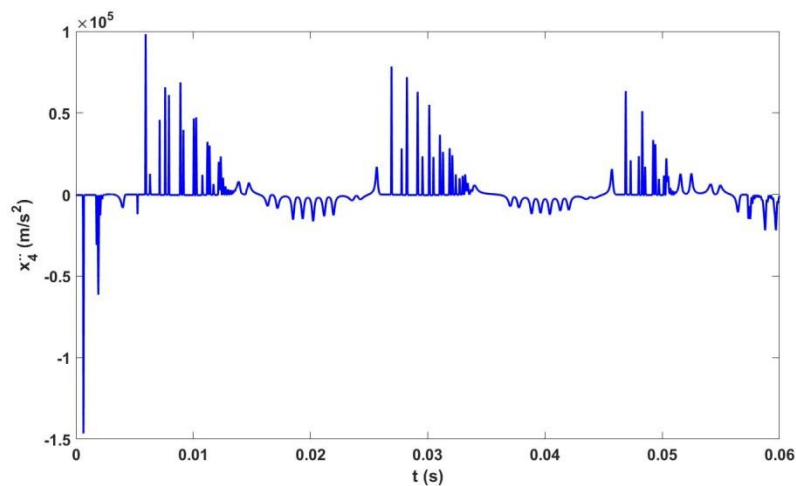


ب- سرعت زاویه‌ای

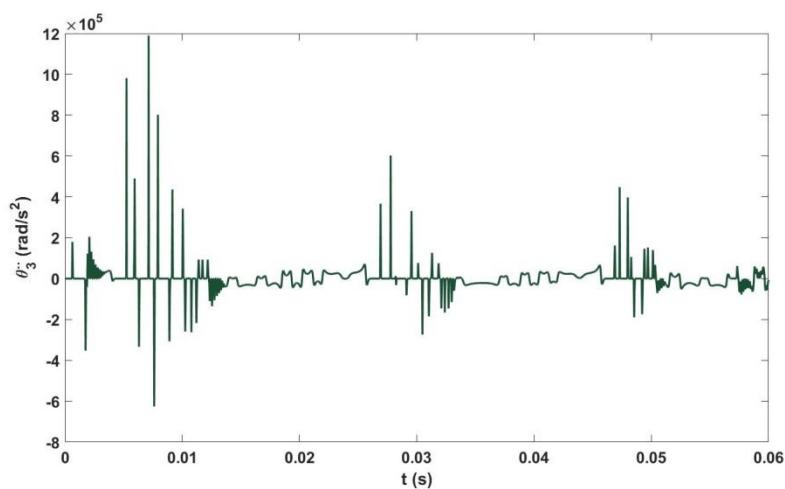


ج- شتاب زاویه‌ای

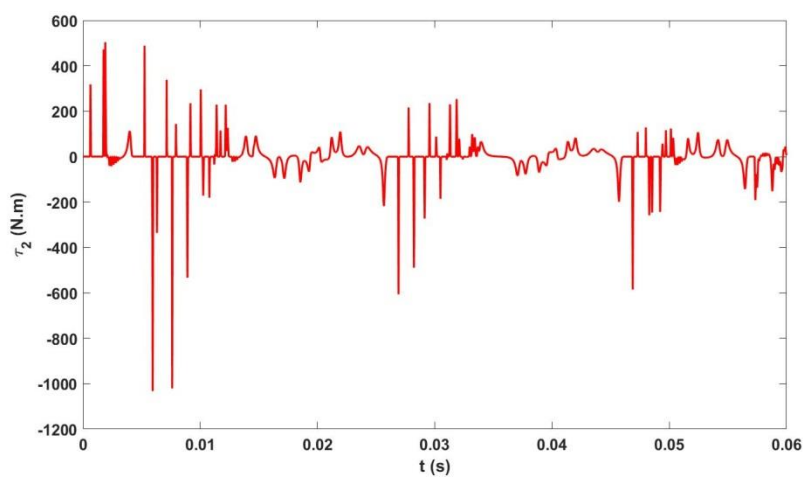
شکل ۵-۲: نمودارهای تغییر زاویه لینک ۳ و سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای آن برای مکانیزم کاملاً ایده‌آل



الف- شتاب خطی لغزنده



ب- شتاب زاویه‌ای لینک ۳



ج- گشتاور ورودی

شکل ۵-۳: نمودارهای مکانیزم لنگ و لغزنده دارای یک مفصل لق و یک مفصل ایده‌آل (بدون مفصل خمشی)

۵-۲- نتایج مفصل شماره ۱

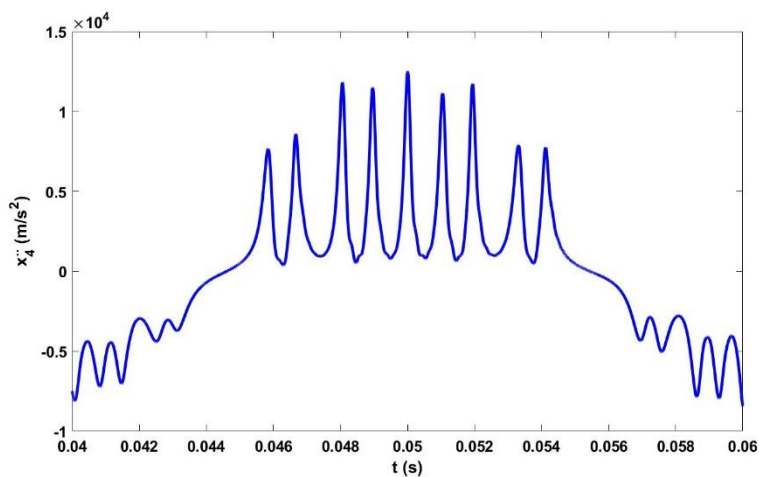
در جداول ۱-۵ و ۲-۵ و ۳-۵ اعداد و نتایج و مقادیر بهینه و مقدار تابع هدف و شکل‌های ۴-۵ الی ۱۵-۵ مربوط به نمودارهای ماکزیمم شتاب خطی، شتاب زاویه‌ای و گشتاور و تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و ملخ را برای هر سه مفصل می‌توان مشاهده و نتایج را مورد بحث و مقایسه قرار داد. توجه شود که مقادیر ارائه شده در ستون اول جدول ۱-۵، در حالت بدون مفصل خمشی، متناظر با مقادیر بیشینه نمودارهای شتاب و گشتاور شکل ۳-۵ در دور سوم دوران مکانیزم هستند.

در جدول ۱-۵ می‌توان نتایج مفصل شماره ۱ را دید که با توجه به نتایج (اعداد) و درصد بهبود کاهشی در الگوریتم ازدحام ذرات نتیجه مطلوب‌تر و بهینه‌تری را به ما نشان می‌دهد، سپس الگوریتم ملخ با درصد ناچیزی در رده دوم و الگوریتم ژنتیک را در رده سوم نتایج می‌توان نام برد.

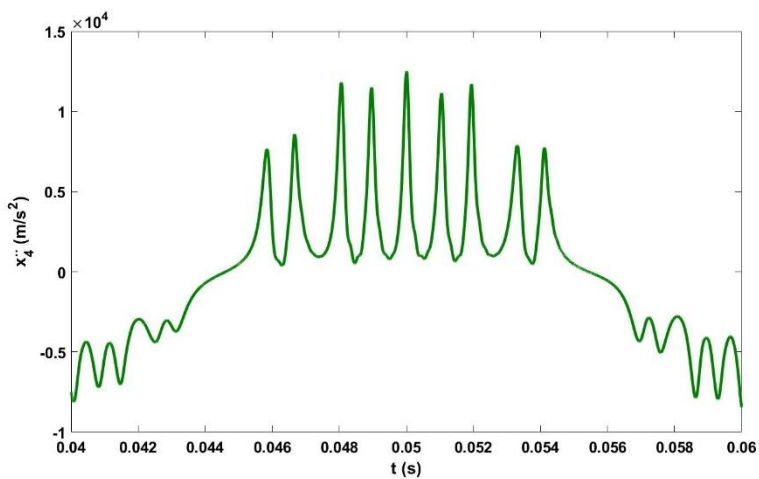
جدول ۱-۵: نتایج مربوط به مفصل شماره ۱

با مفصل خمشی			بدون مفصل خمشی	
GOA	GA	PSO		
۰/۰۵۳۱	۰/۰۵۷۱	۰/۰۷۹۵	---	R (m)
۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۷۲	---	t (m)
۰/۰۴۷۱	۰/۰۶۳۰	۰/۰۰۹۶	---	b (m)
۱/۳	۱/۴	۱/۳	---	E (GPa)
۰/۱۱۸۵	۰/۱۲۷۹	۰/۱۱۸۳	---	F_{tot}
۴/۰۲۶۸×۱۰ ^۴	۴/۳۳۹۶×۱۰ ^۴	۴/۰۰۱۶×۱۰ ^۴	۵/۱۵۲۲×۱۰ ^۵	ماکزیمم شتاب زاویه‌ای
%۹۲	%۹۱	%۹۲	---	درصد بهبود
۱/۱۵۸۸×۱۰ ^۴	۱/۲۵۱۳×۱۰ ^۴	۱/۱۵۸۵×۱۰ ^۴	۷/۲۹۳۷×۱۰ ^۴	ماکزیمم شتاب خطی
%۸۴	%۸۲	%۸۴	---	درصد بهبود
۸۶/۵۸۶۴	۹۲/۸۷۸۶	۸۵/۴۷۳۳	۶۱۵/۵۵۹۸	ماکزیمم گشتاور
%۸۵	%۸۴	%۸۶	---	درصد بهبود

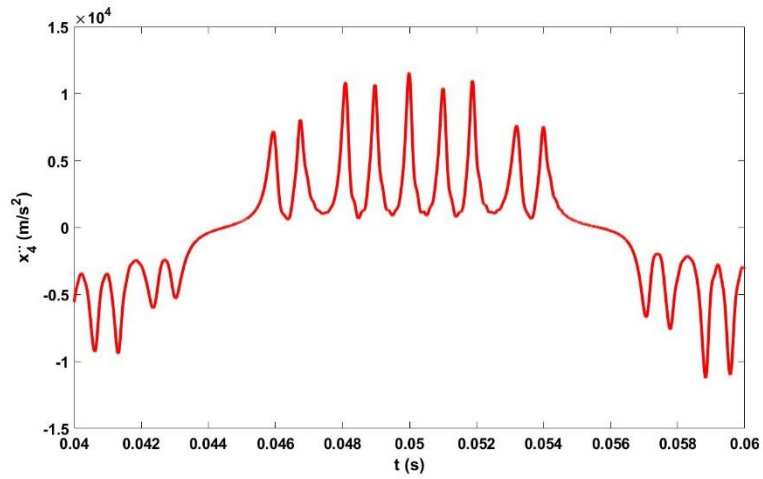
در شکل ۴-۵ و ۵-۵ می‌توان به ترتیب نمودارهای شتاب خطی لغزنده و شتاب زاویه‌ای لینک رابط به ترتیب به روش‌های GA، PSO و GOA ارائه شده است، که نتایج الگوریتم‌های PSO و GOA درصد کاهشی بهتری را نشان می‌دهد.



الف- الگوریتم GA

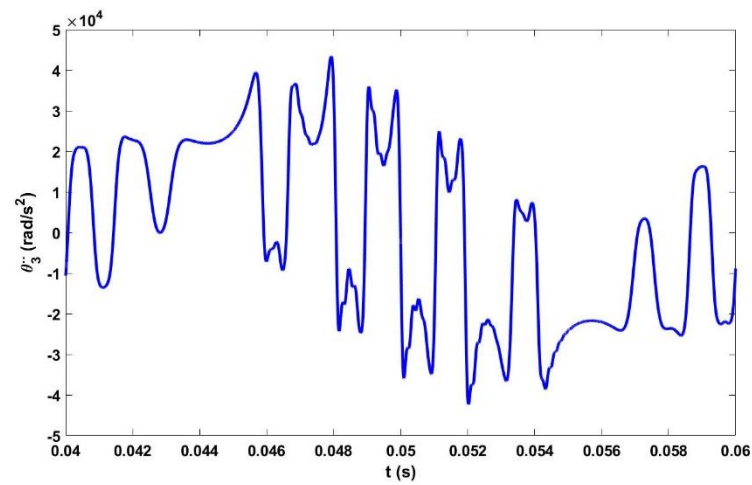


ب- الگوریتم PSO

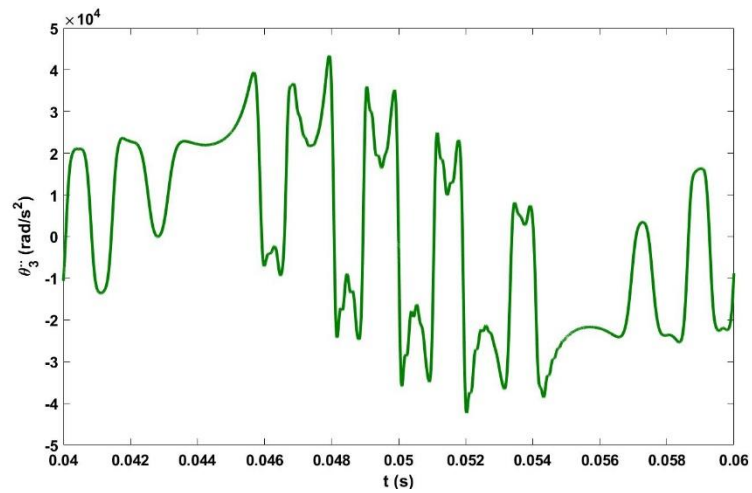


ج- الگوریتم GOA

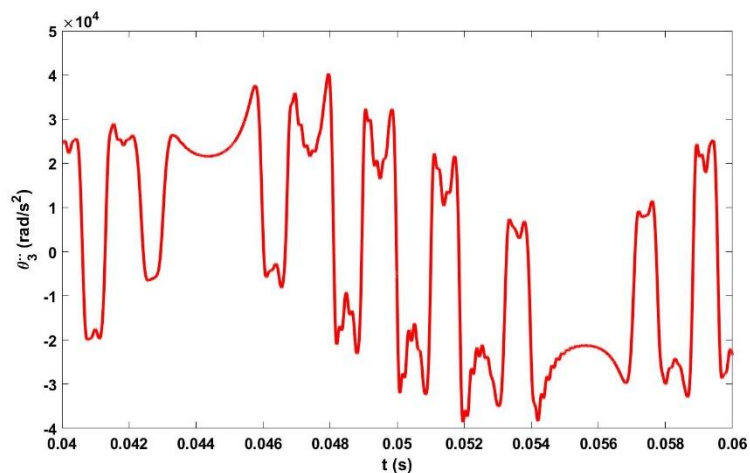
شکل ۵-۴: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۱



الف- الگوریتم GA



ب- الگوریتم PSO

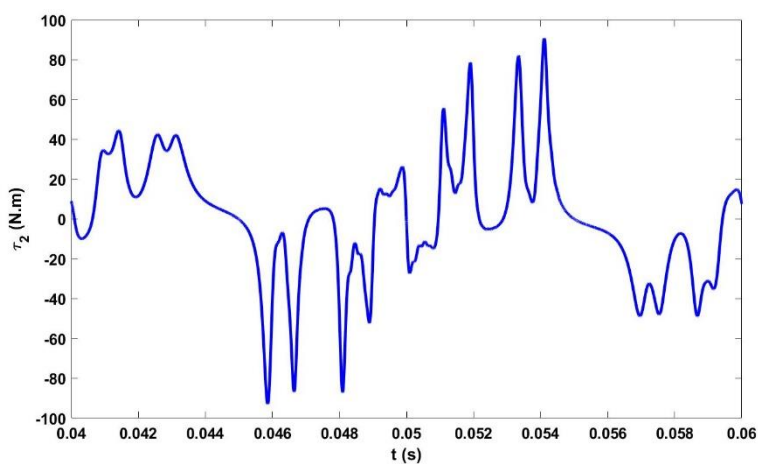


ج- الگوریتم GOA

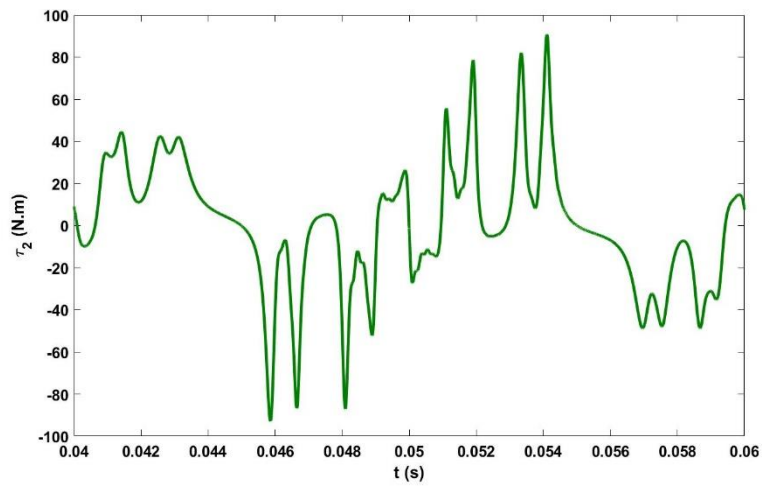
شکل ۵-۵: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۱

در شکل ۵-۶ گشتاور ورودی مکانیزم به ازای طراحی بهینه براساس سه الگوریتم موراستفاده ارائه شده است. باتوجه به این نمودارها که مطابق با نتایج عددی جدول ۵-۱ می‌باشند، می‌توان دریافت الگوریتم ازدحام ذرات، سپس الگوریتم ملخ و در آخر الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب دارای بهترین نتایج بوده‌اند.

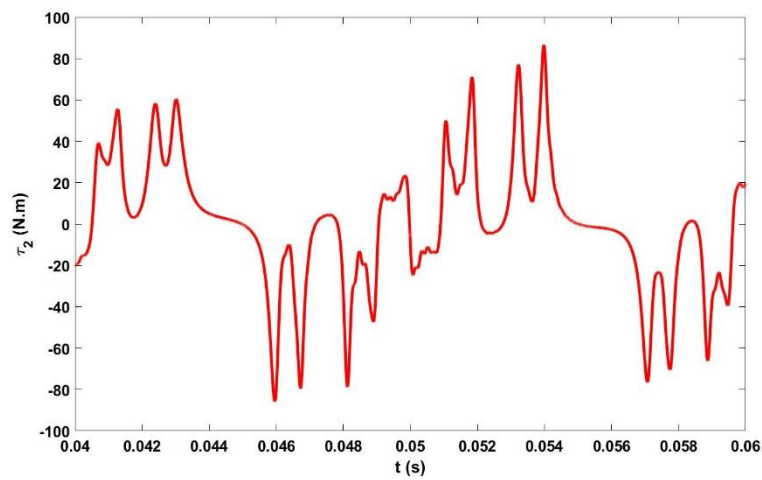
همچنین در شکل ۵-۷ تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است..



الف- الگوریتم GA

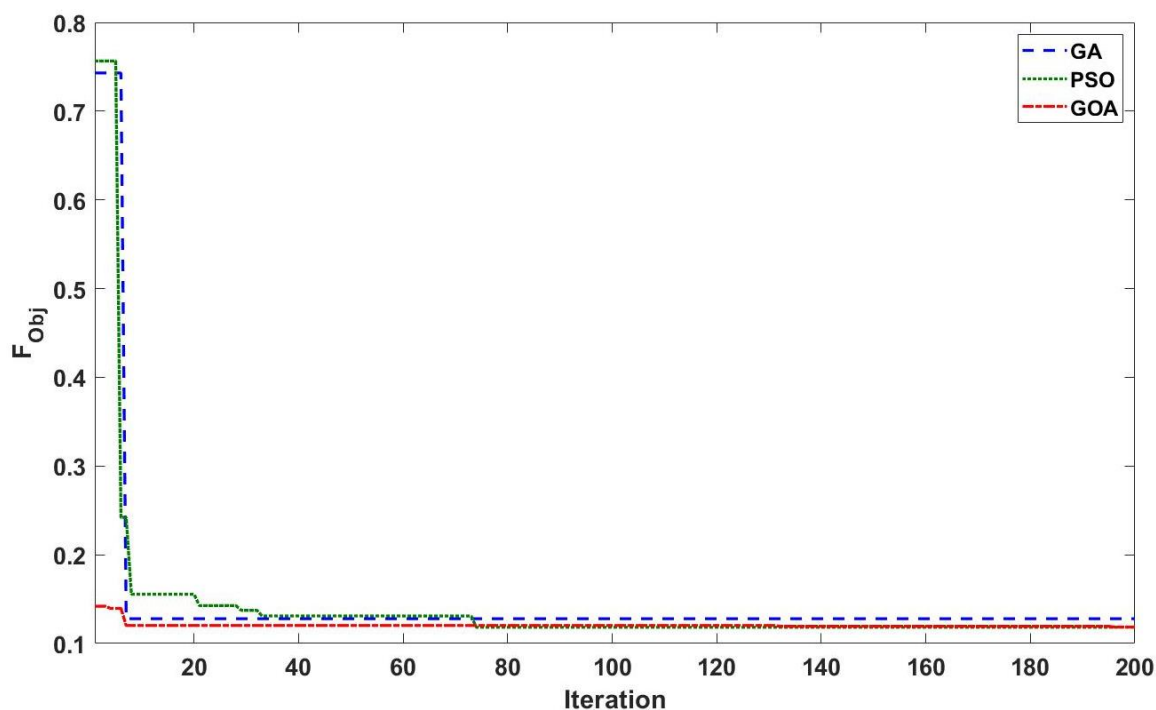


ب- الگوریتم PSO



ج- الگوریتم GOA

شکل ۵-۶: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۱



شکل ۵-۷: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۱

۵-۳- نتایج مفصل شماره ۲

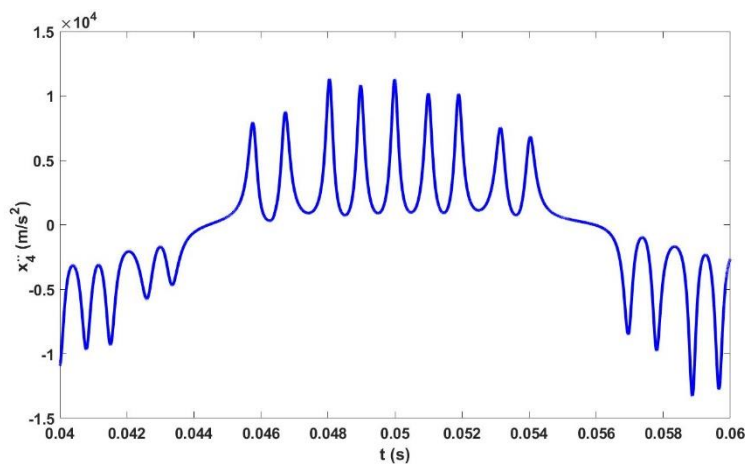
در جدول ۵-۲ می‌توان نتایج مفصل شماره ۲ را دید که با توجه به نتایج (اعداد) و درصد بهبود کاهشی در الگوریتم ملخ و الگوریتم ازدحام ذرات به صورت یکسان و مشابه نتایج مطلوب‌تر و بهینه‌تری را به ما نشان می‌دهد، سپس الگوریتم ژنتیک در رده بعدی قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۲: نتایج مربوط به مفصل شماره ۲

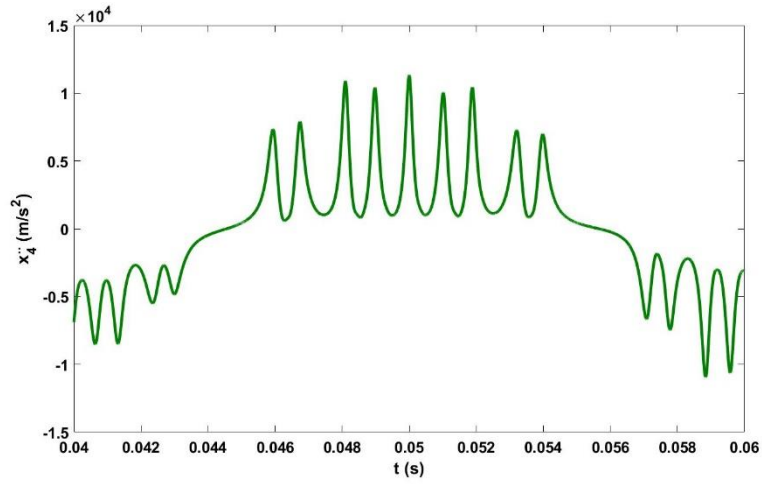
با مفصل خمشی			بدون مفصل خمشی	
GOA	GA	PSO		
۰/۰۶۸۲	۰/۰۶۳۳	۰/۰۹۲۷	---	l (m)
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۸	---	t (m)
۰/۰۵۸۵	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۷۴	---	b (m)
۲/۸۴	۱۱۳	۱/۳	---	E

				(GPa)
۰/۱۱۸۲	۰/۱۳۰۶	۰/۱۱۷۷	---	F_{tot}
$۴/۰.۰۷۷ \times ۱۰^۴$	$۴/۵۰.۰۱ \times ۱۰^۴$	$۴/۱۳.۰۷ \times ۱۰^۴$	$۵/۱۵۲۲ \times ۱۰^۵$	ماکزیمم شتاب زاویه‌ای
%۹۲	%۹۱	%۹۱	---	درصد بهبود
$۱/۱۵۶۲ \times ۱۰^۴$	$۱/۳۲۷۴ \times ۱۰^۴$	$۱/۱۳۳۴ \times ۱۰^۴$	$۷/۲۹۳۷ \times ۱۰^۴$	ماکزیمم شتاب خطی
%۸۴	%۸۱	%۸۴	---	درصد بهبود
۸۴/۷۱۹۸	۱۰۱/۹۸۰۱	۸۷/۲۹۷۹	۶۱۵/۵۵۹۸	ماکزیمم گشتاور
%۸۶	%۸۳	%۸۵	---	درصد بهبود

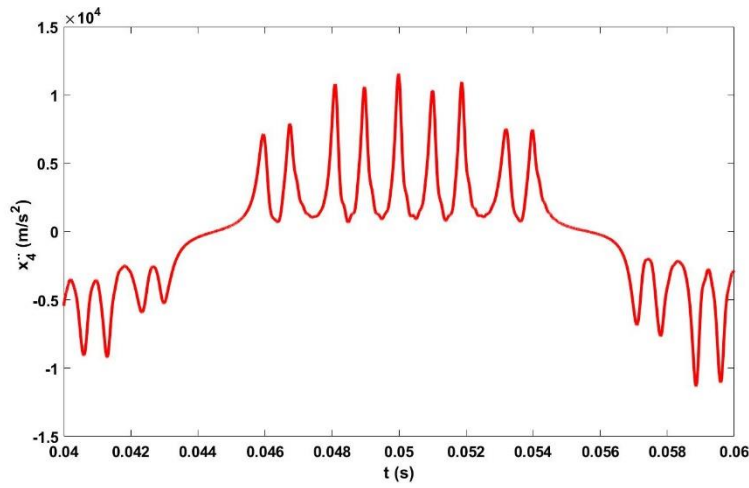
در شکل‌های ۵-۸ تا ۵-۱۱ به ترتیب نمودارهای شتاب خطی لغزنده، شتاب زاویه‌ای عضو رابط، گشتاور ورودی و نمودار تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۲ نشان داده شده است. نتایج این چهار نمودار به ما نشان می‌دهد که الگوریتم ازدحام ذرات و ملخ نتایج یکسان و مشابهی دارند، مطلوب‌تر و بهینه‌تری را به ما نشان داده، سپس الگوریتم ژنتیک در رده بعدی قرار می‌گیرد.



الف- الگوریتم GA

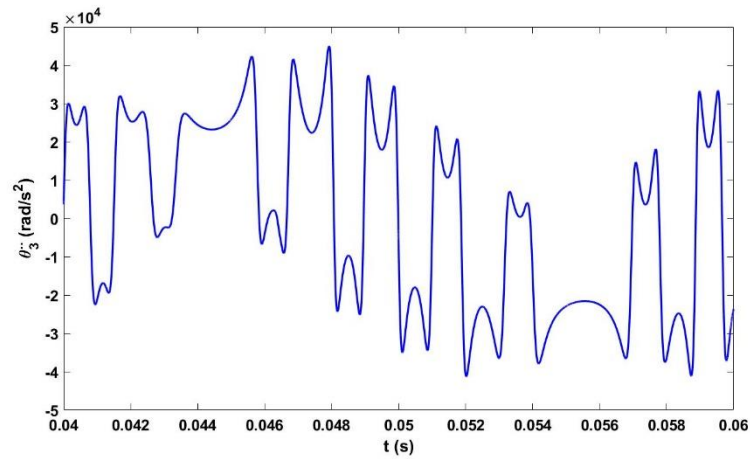


ب- الگوریتم PSO

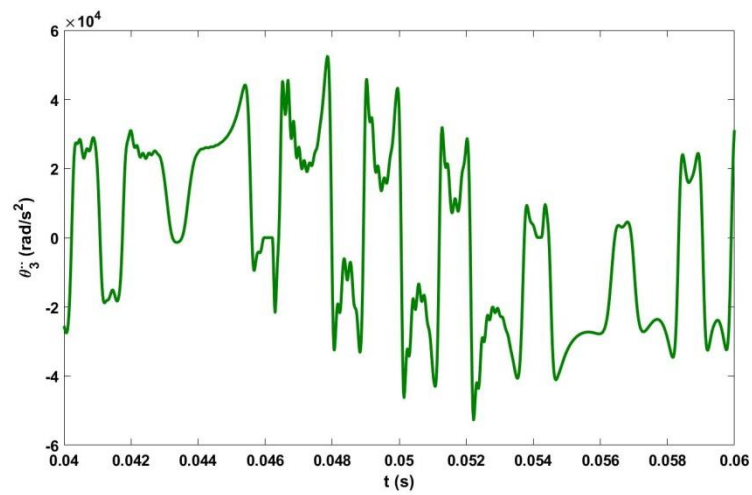


ج- الگوریتم GOA

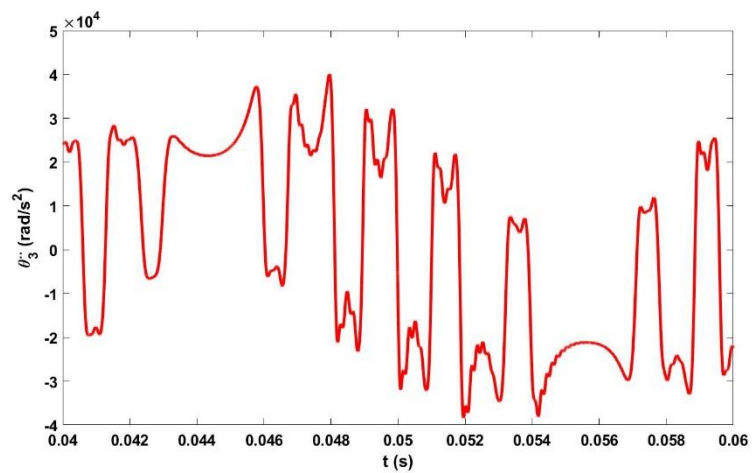
شکل ۵-۸: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۲



الف- الگوریتم GA

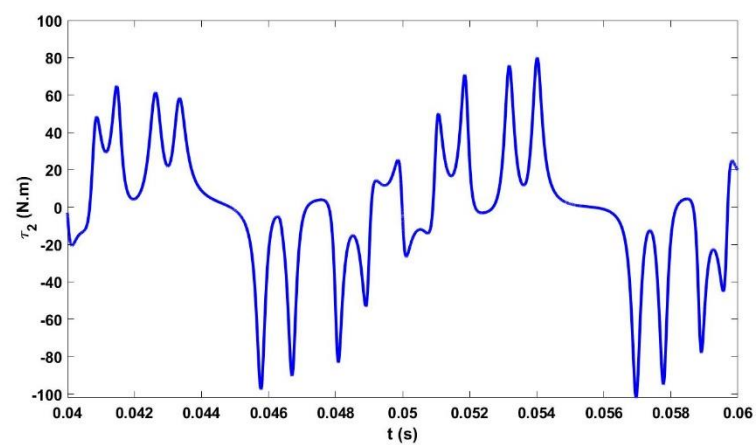


ب- الگوریتم PSO

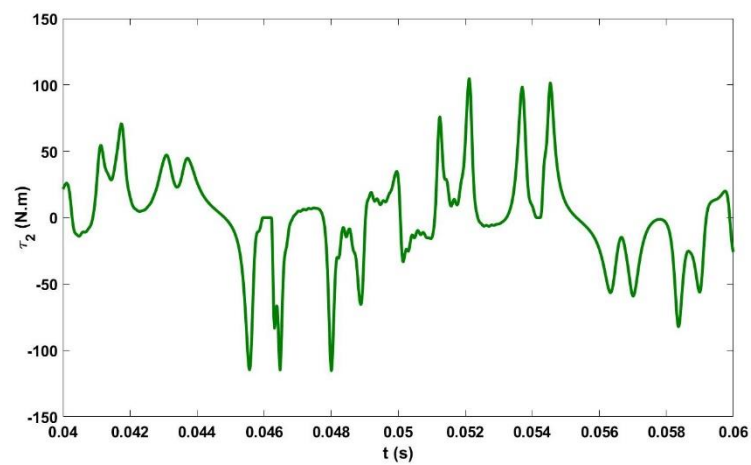


ج- الگوریتم GOA

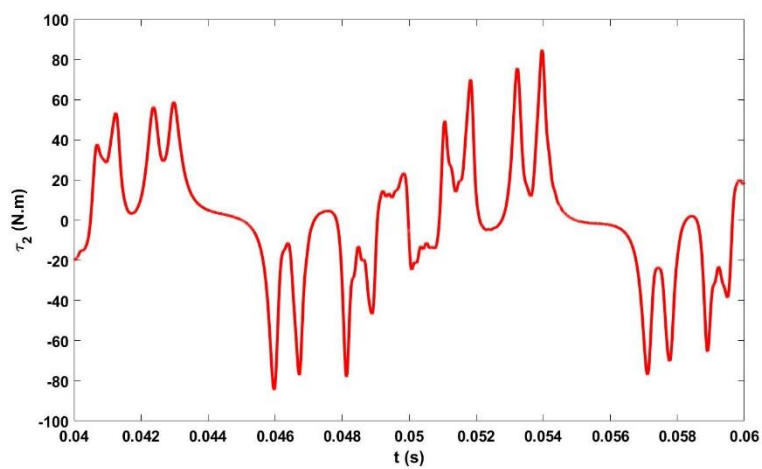
شکل ۵-۹: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۲



الف- الگوریتم GA

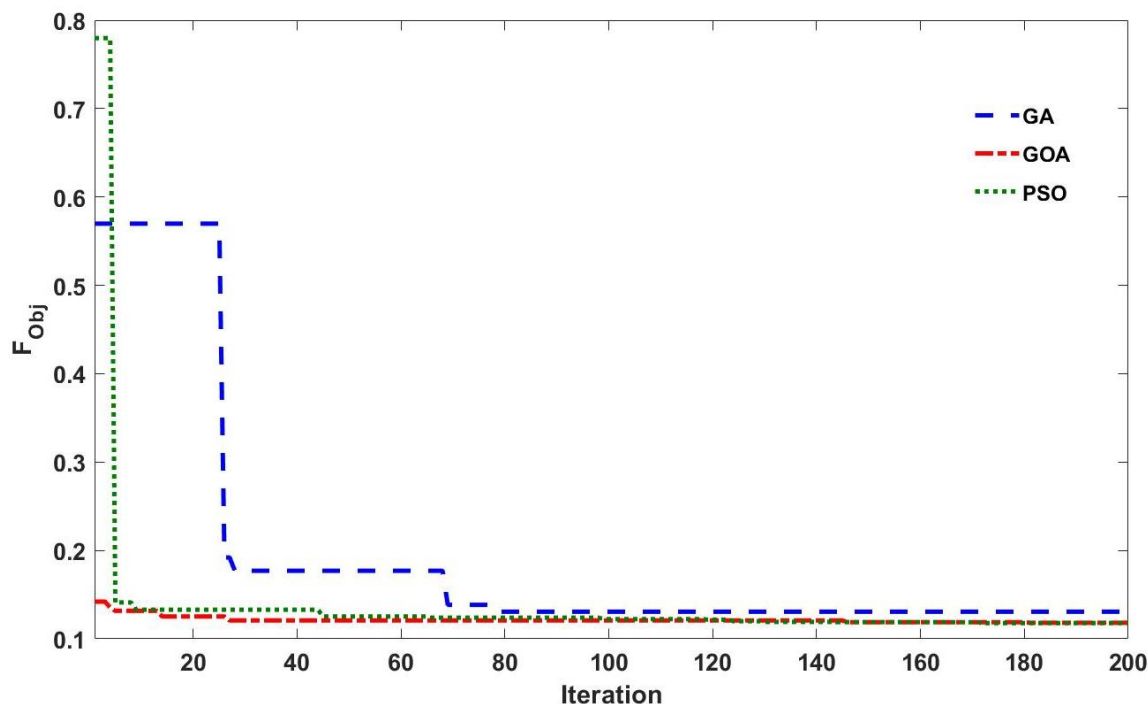


ب- الگوریتم PSO



ج- الگوریتم GOA

شکل ۵-۱۰: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۲



شکل ۵-۱۱: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۲

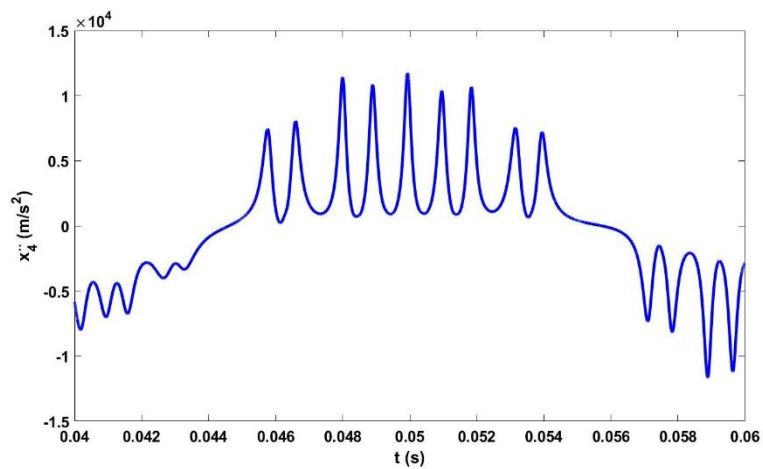
۵-۴- نتایج مفصل شماره ۳

در جدول ۵-۳ می‌توان نتایج مفصل شماره ۳ را دید که با توجه به نتایج (اعداد) و درصد بهبود کاهشی در الگوریتم ازدحام ذرات نتیجه مطلوب‌تر و بهینه‌تری را به ما نشان می‌دهد، و الگوریتم ملخ و ژنتیک نتایج تقریباً مشابهی دارند، در الگوریتم ژنتیک نتیجه مطلوب‌تری را با توجه به درصد کاهش ماکزیمم گشتاور به ما نشان می‌دهد، اما نتیجه مطلوب‌تر کاهش ماکزیمم شتاب خطی برای الگوریتم ملخ است و در کاهش ماکزیمم شتاب زاویه‌ای هر دو الگوریتم ملخ و ژنتیک تقریباً یکسان عمل کرده‌اند.

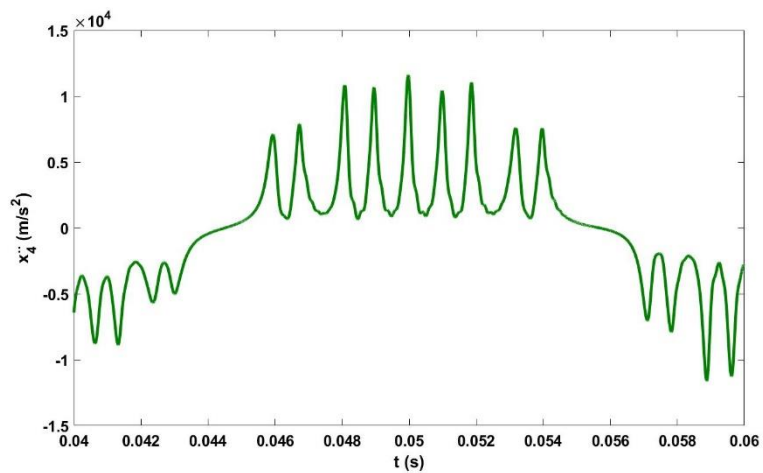
جدول ۵-۳: نتایج مربوط به مفصل شماره ۳

بدون مفصل خمشی	با مفصل خمشی			
	GOA	GA	PSO	
l (m)	۰/۰۷۳۷	۰/۰۷۲۸	۰/۰۶۳۵	---
t (m)	۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۰۳	---
b (m)	۰/۰۳۴۰	۰/۰۰۸۴	۰/۰۵۵۲	---
E (GPa)	۱/۴	۱/۳	۱/۴	---
F_{tot}	۰/۱۲۰۹	۰/۱۲۳۲	۰/۱۱۸۶	---
ماکزیمم شتاب زاویه‌ای	۴/۴۰۰۳×۱۰ ^۴	۴/۴۰۵۳×۱۰ ^۴	۴/۰۲۰۵×۱۰ ^۴	۵/۱۵۲۲×۱۰ ^۵
درصد بهبود	%۹۱	%۹۱	%۹۲	---
ماکزیمم شتاب خطی	۱/۱۴۰۹×۱۰ ^۴	۱/۱۷۳۷×۱۰ ^۴	۱/۱۶۱۰×۱۰ ^۴	۷/۲۹۳۷×۱۰ ^۴
درصد بهبود	%۸۴	%۸۳	%۸۴	---
ماکزیمم گشتاور	۹۶/۲۴۴۱	۹۰/۷۱۶۶	۸۵/۷۰۷۹	۶۱۵/۵۵۹۸
درصد بهبود	%۸۴	%۸۵	%۸۶	---

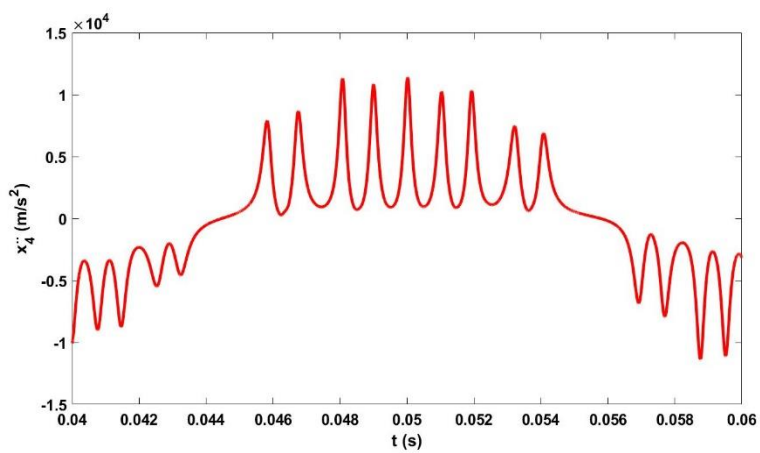
در شکل‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۵ به ترتیب نمودارهای شتاب خطی لغزنده، شتاب زاویه‌ای عضو رابط، گشتاور ورودی و نمودار تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۳ نشان داده شده است. نتایج این چهار نمودار به ما نشان می‌دهد که الگوریتم ازدحام ذرات نتایج مطلوب‌تر و بهینه‌تری را به ما نشان می‌دهد.



الف- الگوریتم GA

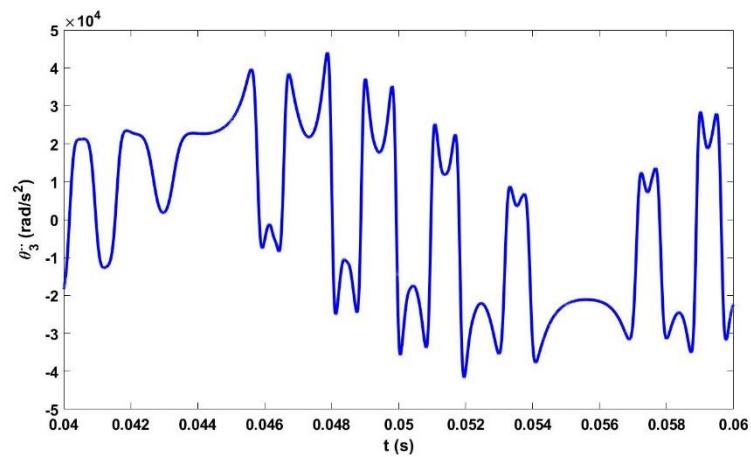


ب- الگوریتم PSO

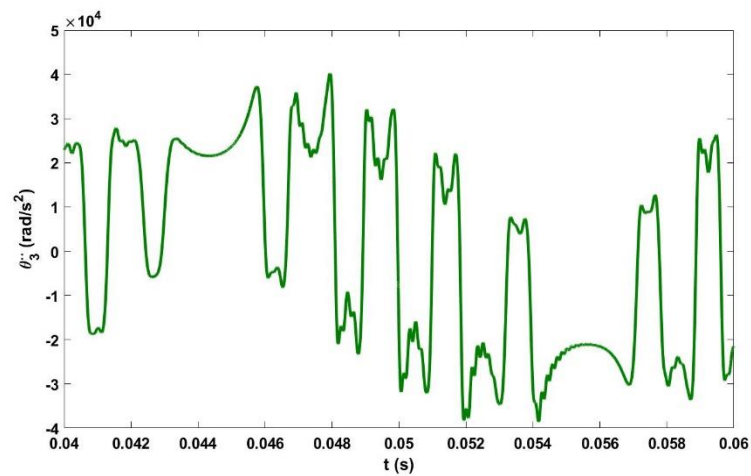


ج- الگوریتم GOA

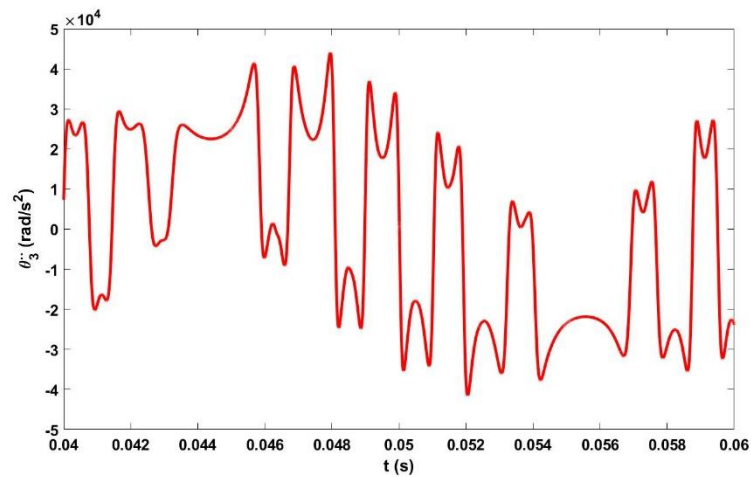
شکل ۵-۱۲: نمودارهای شتاب خطی لغزنده در استفاده از مفصل شماره ۳



الف- الگوریتم GA

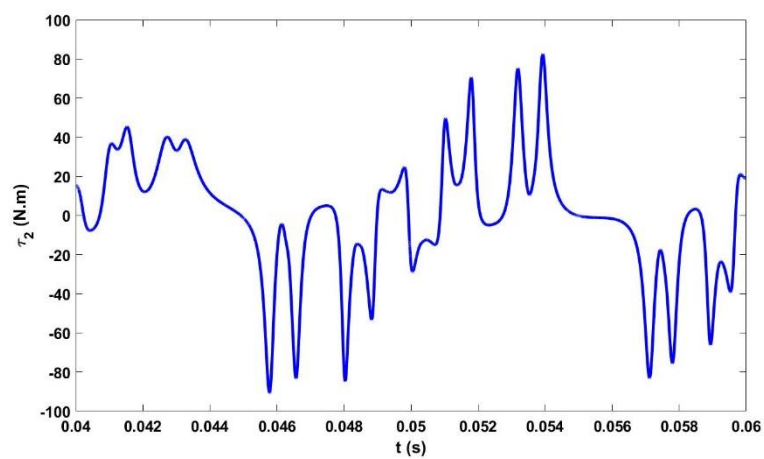


ب- الگوریتم PSO

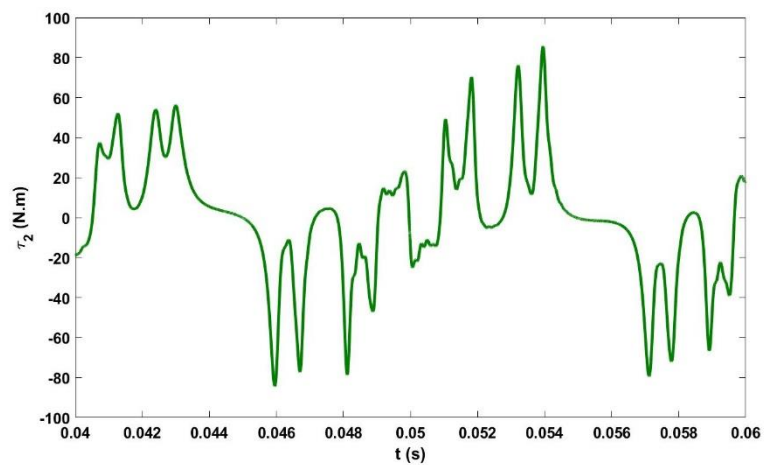


ج- الگوریتم GOA

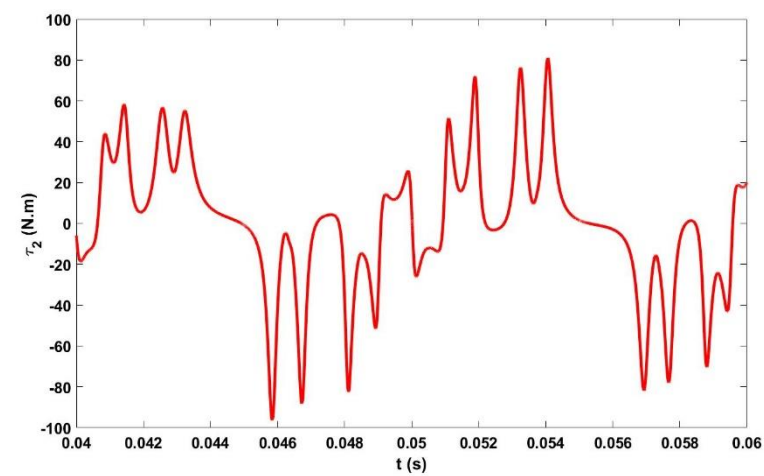
شکل ۵-۱۳: نمودارهای شتاب زاویه‌ای عضو رابط در استفاده از مفصل شماره ۳



الف- الگوریتم GA

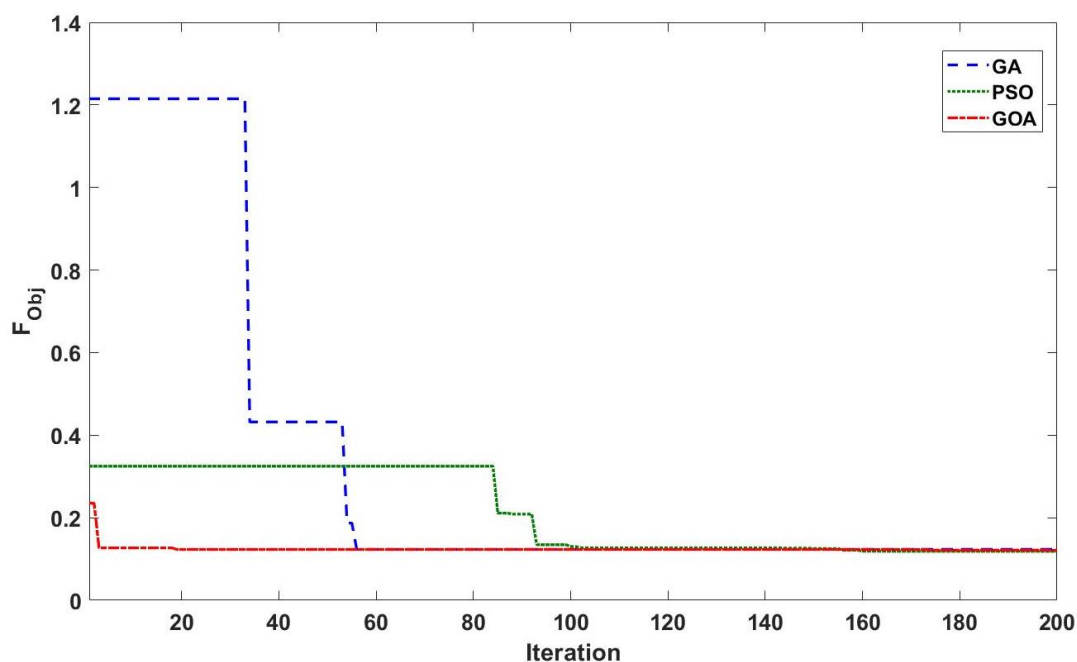


ب- الگوریتم PSO



ج- الگوریتم GOA

شکل ۵-۱۴: نمودارهای گشتاور ورودی در استفاده از مفصل شماره ۳



شکل ۵-۱۵: نمودارهای تغییرات تابع هدف برحسب تکرار برای مفصل شماره ۳

۵-۵- نتایج بهترین الگوریتم و بهترین مفصل

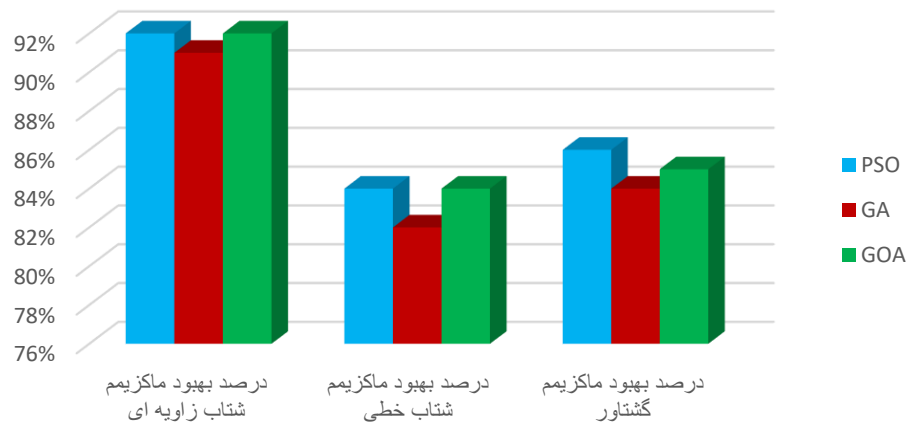
در جدول ۵-۴ درصد بهبود سه مفصل براساس روش‌های بهینه‌سازی مختلف ارایه شده است. همچنین در شکل

۵-۱۶ مقایسه بین این روش‌های بصورت نمودار ستونی نشان داده است تا بتوان مقایسه بهتری انجام داد.

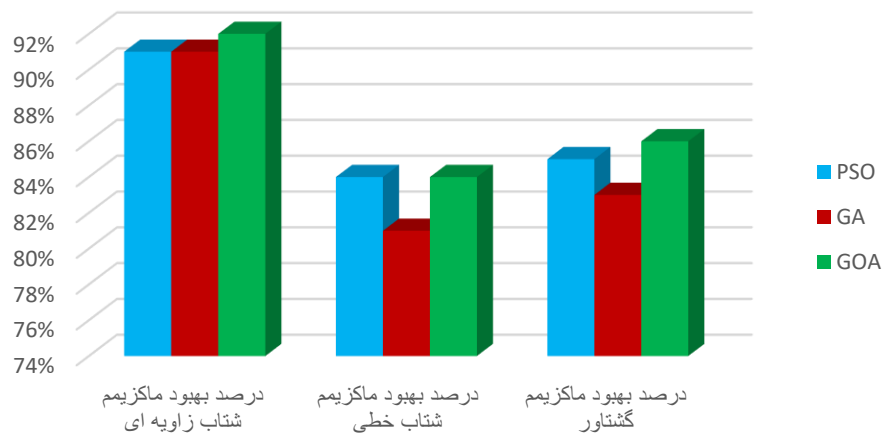
با توجه به درصد‌های بهبود ارایه شده می‌توان نتیجه گرفت که سه مفصل تقریباً نتایج نزدیک به هم داشته‌اند و اختلاف محسوس و چشم‌گیری بین آن‌ها وجود ندارد. در مقایسه بین روش‌های بهینه‌سازی نیز می‌توان دریافت که بهترین روش، روش ازدحام ذرات است، و با اختلاف بسیار کمی روش ملخ در جایگاه دوم و روش ژنتیک در جایگاه سوم قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۴: درصد بهبود مفاصل مختلف

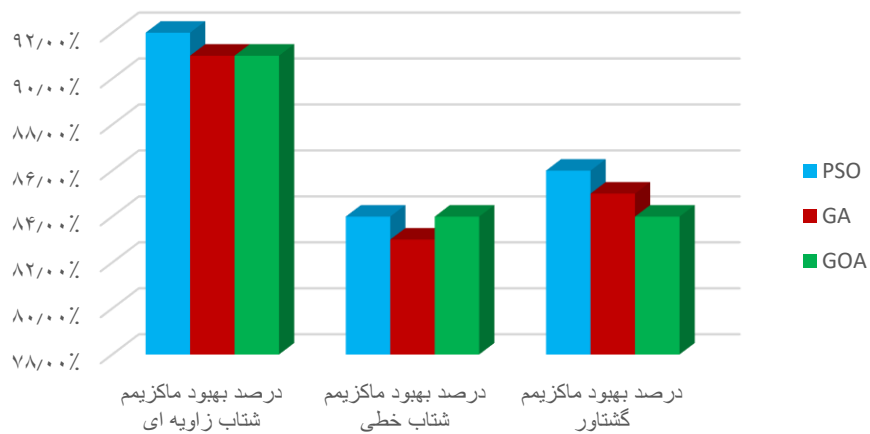
درصد بهبود ماکزیمم شتاب زاویه ای	درصد بهبود ماکزیمم شتاب خطی	درصد بهبود ماکزیمم گشتاور		
%۹۲	%۸۴	%۸۶	PSO	مفصل شماره ۱
%۹۱	%۸۲	%۸۴	GA	
%۹۲	%۸۴	%۸۵	GOA	
%۹۱	%۸۴	%۸۵	PSO	مفصل شماره ۲
%۹۱	%۸۱	%۸۳	GA	
%۹۲	%۸۴	%۸۶	GOA	
%۹۲	%۸۴	%۸۶	PSO	مفصل شماره ۳
%۹۱	%۸۳	%۸۵	GA	
%۹۱	%۸۴	%۸۴	GOA	



الف- مفصل شماره ۱



ب- مفصل شماره ۲



ج- مفصل شماره ۳

شکل ۵-۱۶: مقایسه روش‌های بهینه‌سازی برای مفاصل مختلف

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی و بهبود خصوصیات دینامیکی، کاهش ارتعاشات و در نهایت کم کردن اثرات ناخوشایند لقی با استفاده از مفاصل خمشی است. در ابتدا با استفاده از معادله لاگرانژ معادله دینامیکی مکانیزم لنگ و لغزنده در حالت‌های مختلف، براساس دارابودن مفاصل ایده‌آل، خمشی و یا مفصل لقی، بدست می‌آید. سپس بهینه‌سازی هندسه و جرم مفاصل خمشی براساس کمینه کردن مقادیر بیشینه شتاب، و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ملخ انجام می‌شود. در این پژوهش از سه نوع مفصل خمشی مختلف، که دارای هندسه و روابط متفاوتی بودند، استفاده شده است. با بررسی نتایج فصل پنجم می‌شود به این نتیجه رسید که استفاده از مفصل خمشی می‌تواند بطور چشم‌گیری موجب کاهش شتاب‌ها و در نهایت‌های نیروهای بیشینه موجود در مکانیزم شود. کاهش حدوداً ۹۰ درصدی در مقدار بیشینه شتاب‌ها نشان از عملکرد مناسب استفاده از مفاصل خمشی در این مکانیزم‌ها دارد. در فرایند بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات و سپس الگوریتم ملخ نتایج بهینه‌تری را به ما ارائه داده‌اند. البته در استفاده از مفاصل خمشی باید به ملاحظات مربوط به تنش نیز توجه داشت. شاید بتوان با استفاده از مفاصل خمشی دیگر، توابع هدف جدید، متغیرهای طراحی جدید و حتی الگوریتم‌های فراابتکاری متنوع به درصدهای بالاتری برای بهبود بهینه نیز دست یافت.

۶-۲- پیشنهادات

برای ادامه کار پیشنهادات زیر قابل ارایه است:

۱- انجام این پژوهش برای انواع دیگر مکانیزم‌های صفحه‌ای

۲- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید و مقایسه نتایج آن‌ها

۳- استفاده از تابع هدف‌های جدید و تغییر متغیرهای طراحی با استفاده از خواسته مسئله و پژوهش

۴- استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه و استفاده از آن برای پژوهش

۵- استفاده از انواع دیگر مفاصل خمشی

۶- توجه به مباحث مربوط به تنش و خستگی در این مفاصل

منابع و مراجع

1. Cao, Lin. On advancing the topology optimization technique to compliant mechanisms and robots. Diss. University of Saskatchewan, 2015.
- Oh, Youngseok. *Synthesis of Multistable Equilibrium Compliant Mechanisms*. Diss. 2008.
3. Bapat, Sushrut Gangadhar. "On the design and analysis of compliant mechanisms using the pseudo-rigid-body model concept." (2015).
4. Saxena, A., and G. K. Ananthasuresh. "On an optimal property of compliant topologies." *Structural and multidisciplinary optimization* 19.1 (2000): 36-49.
5. Trease, Brian P., Yong-Mo Moon, and Sridhar Kota. "Design of large-displacement compliant joints." (2005): 788-798.
6. Paros, Jerome M. "How to design flexural hinges." *Mach Design* (1965): 151-156.
7. Farhadi Machekposhti, Davood, N. Tolou, and J. L. Herder. "The scope for a compliant homokinetic coupling based on review of compliant joints and rigid-body constant velocity universal joints." *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 45035. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
8. Howell, Larry L. "Compliant mechanisms." *21st century kinematics*. Springer, London, 2013. 189-216.
9. Cannon, Jesse R., and Larry L. Howell. "A compliant contact-aided revolute joint." *Mechanism and Machine Theory* 40.11 (2005): 1273-1293.
10. Boyle, Cameron. "A Closed-Form Dynamic Model of the Compliant Constant-Force Mechanism using the Pseudo-Rigid-Body Model." (2003).

- 11.Lobontiu, Nicolae. Compliant mechanisms: design of flexure hinges. CRC press, 2020.
- 12.Smith, Stuart T. *Flexures: elements of elastic mechanisms*. Crc Press, 2000.
- 13.Moon, Yong-Mo, Brian Patrick Trease, and Sridhar Kota. "Design of large-displacement compliant joints." *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 36533. 2002.
- 14.Burns, Richard H., and F. R. Crossley. "Kinetostatic synthesis of flexible link mechanisms." *Mechanical Engineering*. Vol. 90. No. 11. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017: ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG, 1968.
- 15.Bisshopp, K. E., and D. C. Drucker. "Large deflection of cantilever beams." *Quarterly of applied mathematics* 3.3 (1945): 272-275.
- 16.Midha, A. "Class Notes for ME 597: Special Topics in Compliant Mechanisms." *The Pennsylvania State University* (1983).
- 17.Salamon, B. A., and Ashok Midha. "An introduction to mechanical advantage in compliant mechanisms." (1998).
- 18.Howell, Larry L., and Ashok Midha. "A loop-closure theory for the analysis and synthesis of compliant mechanisms." (1996): 121-125.
- 19.Simo, J. C., and T. A. Posbergh. "Nonlinear dynamics of flexible structures: geometrically exact formulation and stability." *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 1988.
- 20.Atanackovic, T. M., and L. J. Cveticanin. "Dynamics of plane motion of an elastic rod." (1996): 392-398.
- 21.Wang, Yuxin. "Dynamics of an elastic four bar linkage mechanism with geometric nonlinearities." *Nonlinear Dynamics* 14.4 (1997): 357-375.

- 22.Panza, Michael J. "Mathematical model for large deflection dynamics of a compliant beam mechanism." *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 35203. American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- 23.Liu, Min, Xianmin Zhang, and Sergej Fatikow. "Design and analysis of a high-accuracy flexure hinge." *Review of Scientific Instruments* 87.5 (2016): 055106.
- 24.Friedrich, Robert, and Rolf Lammering. "Flexure Hinge Mechanisms Modeled by Nonlinear Euler-Bernoulli-Beams." *PAMM* 15.1 (2015): 193-194.
- 25.Cosandier, Florent, et al. *The art of flexure mechanism design*. No. BOOK. Epfl Press, 2017.
- 26.Mou, Ben, et al. "Flexural behavior of beam to column joints with or without an overlying concrete slab." *Engineering Structures* 199 (2019): 109616.
- 27.Mou, Ben, et al. "Effect of reinforced concrete slab on the flexural behavior of composite beam to column joints: Parameter study and evaluation formulae." *Journal of Constructional Steel Research* 176 (2021): 106425.
- 28.Zhang, Hongchuan, Xianmin Zhang, and Benliang Zhu. "A novel flexural lamina emergent spatial joint." *Mechanism and Machine Theory* 142 (2019): 103582.
- 29.Zhang, Z. X., et al. "A novel testing setup for determining the flexural properties of tunnel segmental joints: Development and application." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19.3 (2019): 724-738.

30. Le, Tan D., Thong M. Pham, and Hong Hao. "Numerical study on the flexural performance of precast segmental concrete beams with unbonded internal steel tendons." *Construction and Building Materials* 248 (2020): 118362.
31. Ercolini, Edoardo, et al. "Redesigning a flexural joint for metal-based additive manufacturing." *Procedia CIRP* 100 (2021): 469-475.
32. Han, Bin, et al. "Flexural behaviour of improved joint details connecting pre-cast bridge decks." *Engineering Structures* 245 (2021): 112948.
33. Ding, Wenqi, et al. "Flexural behavior of segmental joint containing double rows of bolts: Experiment and simulation." *Tunnelling and Underground Space Technology* 112 (2021): 103940.
34. Pedersen, Claus BW, Thomas Buhl, and Ole Sigmund. "Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms." *International Journal for numerical methods in engineering* 50.12 (2001): 2683-2705.
35. Xiao, Shungen, et al. "Coupling rub-impact dynamics of double translational joints with subsidence for time-varying load in a planar mechanical system." *Multibody System Dynamics* 48.4 (2020): 451-486.
36. Flores, Paulo, et al. *Kinematics and dynamics of multibody systems with imperfect joints: models and case studies*. Vol. 34. Springer Science & Business Media, 2008.
37. Varedi, S. M., H. M. Daniali, and M. Dardel. "Dynamic synthesis of a planar slider–crank mechanism with clearances." *Nonlinear Dynamics* 79.2 (2015): 1587-1600.
38. Varedi, S. M., et al. "Optimal dynamic design of a planar slider-crank mechanism with a joint clearance." *Mechanism and Machine Theory* 86 (2015): 191-200.

- 39.Kolhatkar, S. A., and K. S. Yajnik. "The effects of play in the joints of a function-generating mechanism." *Journal of Mechanisms* 5.4 (1970): 521-532.
- 40.Dubowsky, S., and F. Freudenstein. "Dynamic analysis of mechanical systems with clearances—part 1: formation of dynamic model." (1971): 305-309.
- 41.Lankarani, Hamid M., and Parviz E. Nikraves. "A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems." (1990): 369-376.
- 42.C. Innocenti, Kinematic clearance sensitivity analysis of spatial structures with revolute joints, *Journal of Mechanical Design*, Transaction of the ASME 124 (1) (2002) 52-57.
- 43.V. Parenti-Castelli, S. Venanzi, Clearance influence analysis on mechanisms, *Mechanism and Machine Theory* 40, pp. 1316–1329, 2005.
- 44.Varedi-Koulaei, S. M., et al. "Reducing the undesirable effects of joints clearance on the behavior of the planar 3-RRR parallel manipulators." *Nonlinear Dynamics* 86.2 (2016): 1007-1022.
- 45.Erkaya, Selçuk. "Prediction of vibration characteristics of a planar mechanism having imperfect joints using neural network." *Journal of Mechanical Science and Technology* 26.5 (2012): 1419-1430.
- 46.Norton, Robert L., and Sid Shih-Liang Wang. *Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- 47.Rao, Singiresu S. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2019.
- 48.Gen, Mitsuo, and Runwei Cheng. *Genetic algorithms and engineering optimization*. Vol. 7. John Wiley & Sons, 1999.

- 49.Saremi, Shahrzad, Seyedali Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grasshopper optimisation algorithm: theory and application." *Advances in Engineering Software* 105 (2017): 30-47.

Abstract

Traditional joints always have some clearance which increases vibrations and acceleration. Flexural joints are a new type of joints that the clearance is eliminated and can be built seamlessly. The presence of intrinsic stiffness in the flexural joints increases the stiffness of the joints, and it can reduce the difficulties caused by clearance in other joints. The purpose of this research is to decrease the effect of joint clearance using flexural joints. First, dynamic equations of a plane mechanism with clearance joints and flexural joints are derived. The slider-crank mechanism is used as a plate mechanism, and all processes are implemented. The Lagrange equation is used to extract dynamic equations, and the flexural joints are modeled based on a pseudo rigid body model in which the bending moment is modeled as a torsional spring. The design of several types of flexural joints is based on defining the optimization problem and optimal design. Design variables of optimization problems include joint geometry and material properties. For the objective function, maximum acceleration has been used. Optimization algorithms are solved using three meta-heuristic methods, including GA, PSO, and GOA. The results show that utilizing the flexural joints in the desired mechanism can reduce the maximum values of acceleration required.

Keywords:

Clearance joint, flexural joints, slider crank mechanism, genetic algorithm, particle swarm optimization, Grasshopper Optimization Algorithm.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronic Engineering

Improving the Dynamic Properties of the planar mechanisms with joint clearance using flexure joints

By:

Alireza Jalaly

Supervisor:

Seyyed Mojtaba Varedi-Koulaei

September 2021