بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی
گروه مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

بهینه‌سازی چندهدفی مکانیزم چهارمیله‌ای برای تولید مسیرمعین با نامعینی پارامتری

از:

وحید نورائی فر

استاد راهنما:

دکتر نادر نریمان‌زاده

استاد مشاور:

مهندس محمد ابراهیم فلزی

دی ۸۹

تقدیم به

پدر بزرگوارم که همواره پشتیبانم بوده و به من آموخت که آزاد زندگی کنم، که زبان در بیان زحمات او عاجز است.

و تقدیم به

مهر سپهر وجودم، چراغ پرفروغ عمرم، به قلب مهربان مادرم که هرتپش از قلبش برایم آهنگ زندگی می‌نوازد .

تقدیر

ما همچنان در اول وصف تو مانده‌ایم ...

از استادراهنمای ارجمندم، جناب آقای پروفسور نادر نریمان‌زاده که درتمامی مراحل‌انجام این پایان‌نامه دلسوزانه و با سعه‌صدر یاریم نمودند و راهنمایی‌هایشان راهگشایم بوده و همچنین در شکل‌گیری شخصیت آکادمیک و علمی اینجانب نقش بسزایی داشته‌اند، کمال‌تشکر را دارم.

از استادمشاور بزرگوارم، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم فلزی به خاطر زحمات و راهنما یی‌های بی‌دریغشان سپاسگزارم.

به راهنمایی‌ها و کمک‌های شایان برادر و استادعزیزم، آقای مهندس علی جمالی ارج می‌نهم و همواره خود را رهین الطاف این بزرگوار می‌دانم.

صمیمانه از دوست گرانقدر خود، آقای مهندس جواد رضاپور که در مراحل‌مختلف این‌تحقیق حامی و مددرسانم بوده قدردانی می‌نمایم و موفقیت لحظه‌افزون ایشان را از درگاه خداوندمنان خواستارم.

قدردانی از تمامی اساتید دوران کارشناسی و کارشناسی‌ارشدم به ویژه

جناب آقایان دکتر ابوالفضل درویزه ، دکتر علی جمالی، دکتر غلامرضا زارع پور، دکتر احمد باقری، دکتر علی انصاری، دکتر علی باستی، و مهندس اسدی، که حمایت‌های دلسوزانه و بی‌دریغشان همواره مایه پشت‌گرمی و قوت‌قلبم بوده را وظیفه خود دانسته و همواره از این بزرگواران سپاسگزارم.

از دوستان ارجمندم

آقایان مهندس راهب غلامی، مهندس سامان وهابی و مهندس مهدی گنجی

و خواهر عزیزم خانم مهندس طیبه نورائی فر

که در تهیه وتدوین این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

فهرست مطالب

چکیده فارسی ..... **ذ**

چکیده انگلیسی ..... **ر**

۱ فصل یکم: پیشگفتار **۲**

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مروری بر آثار گذشته ۳

۱-۳ چکیده کار انجام شده در این تحقیق ۵

۱-۴ روند پیش‌رو در این پایان‌نامه ۷

۲ فصل دوم: ترکیب‌بندی مکانیزم‌ها **۹**

۲-۱ پیش درآمد ۹

۲-۲ ترکیب نوعی، عددی و ابعادی ۱۰

۲-۲-۱ ترکیب نوعی ۱۰

۲-۲-۲ ترکیب عددی ۱۱

۲-۲-۳ ترکیب ابعادی ۱۱

۲-۳ طراحی برای موقعیت میله‌رابط ۱۲

۲-۵ زاویه انتقال ۱۵

۲-۶ منحنی‌های مربوط به نقاط واقع بر روی میله‌رابط ۱۷

۲-۶-۱ اطلس منحنی‌های رابط چهار میله‌ای هرونس و نلسون ۱۹

۲-۶-۲ جمع بندی ۲۰

۳ فصل سوم: الگوریتم ژنتیک **۲۲**

۳-۱ پیش درآمد ۲۳

۳-۲ اصول محاسبات الگوریتم‌های تکاملی .....

۳-۳ الگوریتم‌های ژنتیکی ۲۵

۳-۴ رمزگذاری،جهش و پیوند ۲۶

۳-۴-۱ فضای جستجوی عددی و رشته‌های باینری ۲۶
۳-۴-۱-۱ رشته‌های باینری ۲۶
۳-۴-۲ عملگر پیوند ۲۷
۳-۴-۳ عملگر جهش ۲۸
۳-۵ تولید جمعیت اولیه ۲۹
۳-۶ الگوریتم‌های انتخاب ۲۹
۳-۶-۱ انتخاب براساس مکانیزم چرخ گردان ۲۹
۴ فصل چهارم: بهینه‌سازی ۳۳
۴-۱ پیش درآمد ۳۳
۴-۲ ویژگی‌های مسائل بهینه‌سازی ۳۴
۴-۳ روش‌های بهگزینی ۳۴
۴-۳-۱ راهبردهای کاهشی ۳۶
۴-۳-۲ الگوریتم‌های تکاملی ۳۶
۴-۴ ویژگی‌های مسئله مورد بررسی در این پایان‌نامه ۳۷
۴-۵ بهینه‌سازی چندهدفی به‌کمک الگوریتم ژنتیک ۳۸
۴-۵-۱ مفاهیم بهینه‌سازی چندهدفی ۳۸
۴-۵-۲ الگوریتم ژنتیک ۴۰
۴-۵-۳ پیاده‌سازی بهینه‌سازی چندهدفی در الگوریتم ژنتیک ۴۳
۴-۵-۴ روند بهینه‌سازی در Modified NSGAII ۴۵
۵ فصل پنجم: تحلیل احتمالاتی ۴۹
۵-۱ پیش درآمد ۴۹
۵-۲ نامعینی احتمالاتی ۵۰
۵-۲-۱ توزیع احتمالاتی و تابع چگالی احتمالی ۵۱
۵-۲-۲ تابع توزیع جمعیت

۵-۳ نمایش سیستم‌های نامعین ۵۳
۵-۴ تحلیل احتمالاتی ۵۳

۵-۴-۱ متغیرهای تصادفی ۵۳
۵-۴-۲ فرآیندهای تصادفی ۵۹
۵-۵ نمونه برداری و شبیه‌سازی مونت کارلو ۵۹
۵-۵-۱ روش نمونه برداری همرسلی ۶۳
۵-۶ میانگین و واریانس ۶۴
۵-۷ بهینه‌سازی مقاوم ۶۵
۶ فصل ششم: بحث و نتایج ۶۹
۶-۱ پیش درآمد ۶۹
۶-۲ مکانیزم چهارلینکی مورد بررسی در این‌پایان‌نامه ۷۰
۶-۳ اثرات لقی لولا در مکانیزم چهارلینکی و تعیین مسیر پیموده شده ۷۱
۶-۳-۱ لقی لولا و روابط حاکم بر آن ۷۱
۶-۴ بهینه سازی مکانیزم چهارلینکی با در نظر گرفتن میزان لقی مشخص ۷۶
۶-۴-۱ بررسی توابع هدف ۷۶
۶-۴-۲ نتایج مربوط به بهینه سازی با لقی لولای معین ۷۷
۶-۴-۳ اعتبار سنجی ۸۴
۶-۵ بهینه سازی مکانیزم چهارلینکی با در نظر گرفتن نامعینی برای لقی لولا ۸۵
۶-۵-۱ بررسی احتمالاتی و توابع هدف ۸۵
۶-۵-۲ نتایج بهینه سازی تحلیل نامعین ۸۶
۶-۵-۳ بررسی اعتبار مقاوم بودن نتایج ۸۷
۷ فصل هفتم: نتیجه‌گیری ۹۷
۷-۱ نتیجه‌گیری ۹۷
۷-۲ پیشنهاد برای ادامه کار ۹۸
مراجع ۱۰۰

فهرست جدول ها

جدول ۳-۱ پنج جمعیت نمونه و برازندگی مربوط به آنها..... ۳۲

جدول ۴-۱ الگوریتم زیر برنامه FNDF..... ۴۶

جدول ۴-۲ الگوریتم زیر برنامه FNDS..... ۴۷

جدول ۴-۳ الگوریتم زیر برنامه ε-elimination (حذف بردارهایی با متغیرهای‌طراحی و مقدار تابع‌هدف یکسان)...۴۷

جدول ۶-۱ مقادیر پارامترهای هندسی و دینامیکی مکانیزم پایه..... ۷۰

جدول ۶-۲ مؤلفه‌های الگوریتم ژنتیک در تعیین زاویه لینک مجازی..... ۷۵

جدول ۶-۳ مؤلفه‌های الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی مکانیزم با لقی مشخص..... ۷۹

جدول ۰-۴ ابعاد هندسی و مقادیر توابع هدف تحلیل معین مکانیزم های بهینه..... ۷۹

جدول ۰-۵ ابعاد هندسی و مقادیر توابع هدف تحلیل معین مکانیزم های مرجع [۵۴] ۷۹

جدول ۶-۶ مقایسه نتایج با مرجع [۵۴] ۸۴

جدول ۶-۷ مؤلفه‌های الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی با در نظر گرفتن نامعینی ۸۶

جدول ۰-۸ مقادیر پارامترهای هندسی مکانیزمهای بهینه ومکانیزمهای حاصله مرجع [۵۴] ۸۷

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱ موقعیت‌های عضورابط یک مکانیزم چهارلینکی..... ۱۲
شکل ۲-۲ تعیین سرعت عضورابط مکانیزم چهارلینکی..... ۱۳
شکل ۲-۳ طرح مکانیزم چهارلینکی با میله‌رابط در سه موقعیت مشخص..... ۱۴
شکل ۲-۴ طرح یک مکانیزم چهارلینکی(لنگ- آونگ)..... ۱۵
شکل ۲-۵ دیاگرام آزاد میله‌ها در یک مکانیزم چهارلینکی..... ۱۶
شکل ۲-۶ زاویه انتقال μ در یک مکانیزم چهارلینکی..... ۱۸
شکل ۲-۷ نامگذاری های مورد استفاده در اطلس منحنی رابط مکانیزم چهارمیله‌ای هرونس و نلسون..... ۱۹
شکل ۲-۸ شبکه مستطیل‌شکل متصل به میله‌رابط مکانیزم چهارمیله‌ای اطلس هرونس و نلسون..... ۲۰
شکل ۲-۹ تعیین بندگارهای مورد بررسی در بخش ۲-۶..... ۲۱
شکل ۱۰۰۰ ۲= A (طول کوپلر)، ۲= B (طول پیرو)و ۲= C (طول پایه)..... ۲۱
شکل۳-۱ ژنومی دارای سه پارامتر که شامل ۸ بیت برای هر پارامتر می‌باشد..... ۲۸
شکل ۳-۲ عملگر پیوند یک‌نقطه‌ای..... ۲۹
شکل ۳-۳ عملیات جهش روی یک کروموزوم..... ۳۰
شکل ۴-۱ دو تابع هدف f_1 و f_2 برای بهینه‌سازی چندهدفی..... ۴۱
شکل ۴-۲ روند اجرای الگوریتم ژنتیک..... ۴۴
شکل ۵-۱ نامعینی کراندار و نامعینی احتمالاتی..... ۵۲
شکل ۵-۲ احتمال بدست‌آمده با استفاده از مساحت زیر تابع $f(x)$ ۵۲
شکل ۵-۳ منحنی PDF و CDF..... ۵۳
شکل ۵-۴ سیستم جرم- فنر- دمپر..... ۵۵
شکل ۵-۵ میزان فراوانی ماکزیمم فراجهش..... ۵۵
شکل ۵-۶ منحنی CDF ماکزیمم فراجهش..... ۵۶
شکل ۵-۷ منحنی تابع توزیع احتمالاتی و نواحی شکست..... ۵۷
شکل ۵-۸ پاسخ احتمالاتی سیستم جرم- فنر- دمپر..... ۵۸
شکل ۵-۹ نمایی از فرآیند تصادفی $x(h)$ ۶۰

شکل ۵-۱۰ فرآیند شبیه سازی به روش مونت‌کارلو..... ۶۱
شکل ۵-۱۱ اعداد تصادفی تولید شده بین صفر و یک برای ۱۰۰ و ۵۰۰ نمونه..... ۶۳
شکل ۵-۱۲ الف) نقاط و نمونه‌های تولیدشده توسط روش مونت‌کارلو ب) نقاط و نمونه‌های تولیدشده توسط.....
روش همرسلی..... ۶۵
شکل۶-۱ مکانیزم چهارلینکی در دستگاه مختصات مرجع..... ۷۰
شکل ۶-۲ مدل لقی لولا و لینک مجازی شبیه سازی شده ۷۱
شکل ۶-۳ مدل مکانیزم چهارلینکی با در نظر گرفتن لقی در لولای دوم و مدل برداری آن..... ۷۲
شکل ۶-۴ نمودار زاویه لینک مجازی بر حسب زاویه لینک ورودی ۷۵
شکل ۶-۵ مسیر پیموده شده توسط مکانیزم پایه بدون در نظر گرفتن لقی و با در نظر گرفتن ا میلیمتر لقی..... ۷۶
شکل ۶-۶ مسیر پیموده شده توسط مکانیزم پایه بدون در نظر گرفتن لقی و با در نظر گرفتن ۲ میلیمتر لقی.....۷۷
شکل ۶-۷ نمودار پارتو مربوط به بهینه سازی مکانیزم با مقدار لقی لولای ۱ میلیمتر.....۷۸
شکل۶-۸ نمودار پارتو مربوط به بهینه سازی مکانیزم با مقدار لقی لولای ۲ میلیمتر..... ۷۸
شکل ۶-۹ مسیر پیموده شده توسط مکانیزم پایه بدون لقی و مکانیزم بهینه و پایه با لقی لولای ۱ میلیمتر..... ۸۰
شکل۶-۱۰ مسیر پیموده شده توسط مکانیزم پایه بدون لقی و مکانیزم بهینه و پایه با لقی لولای ۲ میلیمتر ۸۱
شکل ۶-۱۱ خطای مسیر پیموده شده توسط مکانیزم بهینه و پایه با مسیر هدف در راستای x و y برای لقی ۱ میلیمتر.....۸۲
شکل ۶-۱۲ خطای مسیر پیموده شده توسط مکانیزم بهینه و پایه با مسیر هدف در راستای x و y برای لقی ۲ میلیمتر.....۸۲
شکل ۶-۱۳ زاویه انتقال حاصله از مکانیزم پایه بدون لقی و مکانیزمهای بهینه A و پایه با لقی لولای ۱ میلیمتر.....۸۳
شکل ۶-۱۴ زاویه انتقال حاصله از مکانیزم پایه بدون لقی و مکانیزمهای بهینه B و پایه با لقی لولای ۲ میلیمتر.....۸۴
شکل ۶-۱۵ نمودار پارتو مربوط به بهینه سازی مکانیزم با در نظر گرفتن نامعینی در میزان لقی.....۸۶
شکل ۶-۱۶ مقایسه مسیرهای طی شده نقطه A تحلیل معین با نقطه C تحلیل نامعین.....۸۸
شکل ۶-۱۷ مقایسه مسیرهای طی شده نقطه B تحلیل معین با نقطه C تحلیل نامعین.....۸۹
شکل ۶-۱۸ میزان فراوانی خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی C.....۹۰
شکل ۶-۱۹ منحنی PDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی C.....۹۰
شکل ۶-۲۰ منحنی CDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی C ۹۱
شکل ۶-۲۱ میزان فراوانی خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی A.....۹۱
شکل ۶-۲۲ منحنی PDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی A.....۹۲

شکل ۶-۲۳ منحنی CDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی A.....۹۲
شکل ۶-۲۴ میزان فراوانی خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی B.....۹۳
شکل ۶-۲۵ منحنی PDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی B.....۹۳
شکل ۶-۲۶ منحنی CDF خطای پیمایش مکانیزم های تولید شده حول بردار طراحی B.....۹۴

بهینه سازی چند هدفی مکانیزم چهار میله ای با لقی لولا برای تولید مسیر معین با نامعینی پارامتری

وحید نورائی‌فر

چکیده

مکانیزم‌ها به اعضای صلب متصل به همی گفته می‌شوند که به طور وسیع در فضای مهندسی مکانیک برای انتقال سرعت وانرژی از یک یا چند عضو ورودی به یک یا چند عضو خروجی استفاده می‌شوند. تحلیل و تلفیق از جمله مفاهیم مورد بحث در طراحی مکانیزم‌ها هستند. سه نوع تلفیق، در بحث تلفیق ابعادی برای مکانیزم‌ها معرفی شده است: تلفیق تولید تابع، تلفیق تولید حرکت و تلفیق تولید مسیر. برای تلفیق ابعادی از دو روش تحلیلی و گرافیکی استفاده می‌شود. هر چند، این روشها به خاطر نرخ دقت کمشان نسبتا محدودکننده هستند به طوریکه نمی‌توانند درطراحی وسیع انواع متنوع مکانیزم‌ها، به ویژه وقتی تعداد نقاط دقت و پیچیدگی مسائل افزایش می‌یابد، مورد استفاده قرارگیرند. به منظوراز بین بردن این کمبودها، روش‌های بهینه‌سازی به طور فزاینده‌ای در سال‌های آتی برای تلفیق ابعادی مکانیزم‌ها (به ویژه برای تولید مسیر) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مسئله تلفیق مسیر که موضوع این پایان‌نامه است، با استفاده از تعدادی نقاط هدف که توسط رابط مکانیزم چهارمیله‌ای باید طی شوند، تلفیق مسیر انجام گرفته است، بنابراین روش بهینه‌سازی برای یافتن اندازه‌های هندسی و ابعادی مکانیزم مانند طولها و زاویه‌ها ، به‌کار رفته است به طوریکه خطای میان مسیر هدف و مسیر واقعی طی شده بوسیله‌ی رابط مکانیزم چهارمیله‌ای را کمینه نماید.

امروزه یکی از مشکلات اساسی در زمینهٔ طراحی بهینه مکانیزم‌ها وجود نامعینی در مکانیزم‌هاست. نا معینی در مکانیزمها به صورت کلی ناشی از تغییر طول ابعاد و همچنین وجود لقی لولا میباشد. که لقی لولا موضوع مورد بررسی در این تحقیق است. با گنجاندن تحلیل احتمالاتی در بهینه‌سازی چندهدفی به کمک الگوریتم ژنتیک سعی شده است به حالت بهینه و مقاوم در مقابل نامعینی‌هایی که درواقعیت وجود دارند برسیم. در این پایان‌نامه از روش شبیه سازی شبه مونت کارلو در بهینه‌سازی چندهدفی استفاده شده‌است. استفاده از روش شبه مونت کارلو به خاطر در نظر گرفتن تابع توزیع احتمالاتی به واقعیت نزدیکتر است. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده، تمامی نقاط بهینهٔ طراحی از دید توابع هدف در اختیار طراح قرار گرفته‌اند و طراح با توجه به نیاز خود یکی از این نقاط را انتخاب می‌کند و در پایان کار، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده در حالت نامعین با حالت معین صورت گرفته‌است. این مقایسه نیرومندی مقاوم بودن پاسخ در این تحقیق را تایید می کند.

کلید واژه‌ها: مکانیزم،لقی لولا، الگوریتم ژنتیک، پارتو، نامعینی ، روش شبه مونت کارلو، طراحی مقاوم.

Multi-objective optimum design of four-bar linkage with joint clearance for path generation with parametric uncertainty

Vahid Nooraeefar

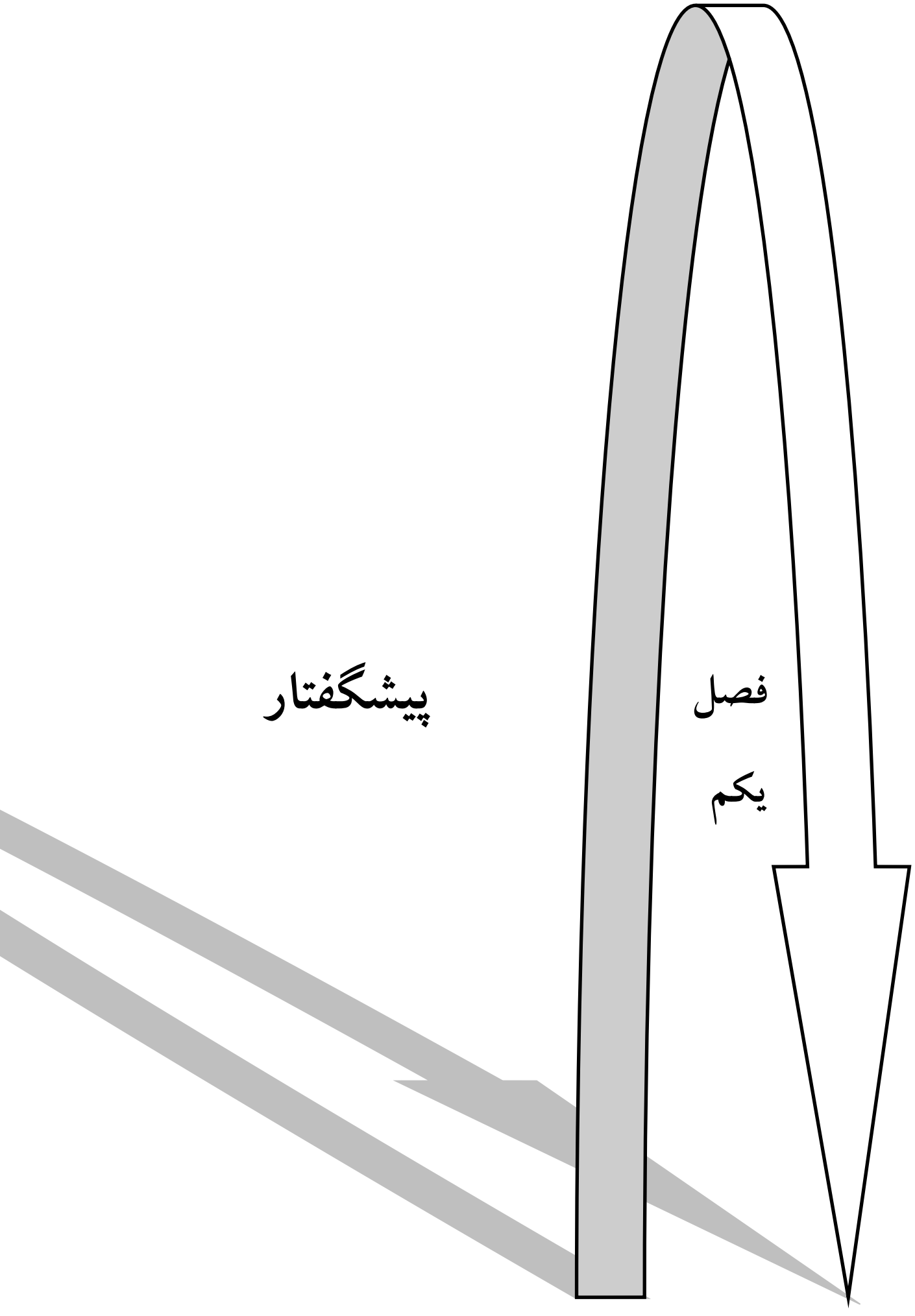
Abstract

Mechanisms which compose some connected rigid members are exclusively used in the area of mechanical engineering for motion and energy transfer from one or more input members to one or more output members. The concepts involved within the design of mechanisms are analysis and synthesis. In the case of dimensional synthesis, there are three categories, namely, motion generation, function generation and path or trajectory generation. Both graphical and analytical methods have been used for dimensional synthesis. However, such methods are relatively restrictive because of their low precision rates and that they cannot be used in the design of wide variety kinds of mechanisms, particularly when the number of precision points and the complexity of problems increase. In order to circumvent these shortcomings, optimization methods have been increasingly used in recent years for the dimensional synthesis of mechanisms especially for path or trajectory generation. In path generation problem, which is the problem of this dissertation, synthesis is accomplished by using some number of precision points to be traced by the coupler point of the mechanism. Thus, an optimization method is employed to find the set of dimensional or geometrical sizes of a mechanism, e.g. lengths, angles, so that the error among the desired path and the actual path by the coupler point is minimized.

However, nowadays, one of the major problems in the design of mechanisms is uncertainty.Uncertainties in mechanisms can be be in the form of dimentional tolerances in the links, clearance in the joints and so on. Joint clearance is the topic that has been considered in this dissertation. It is desired to achieve an optimum yet robust design against uncertainties existing in reality with the use of probabilistic analysis in a multiobjective optimization approach A multi-objective genetic algorithm (GA) is used for the Pareto optimization of four-bar linkages. Finally, the comparison between the results of deterministic and probabilistic design approach are presented.

Keywords: Mechanism, Joint Clearance, Genetic Algorithm, Pareto, Uncertainty, Quasi-Monte Carlo method, Robust Design.

پیشگفتار



۱ فصل یکم: پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

مکانیزم، یک ابزار مکانیکی است که به منظور انتقال حرکت و یا نیرو از یک منبع به یک خروجی بکار می‌رود. طراحی و ترکیب‌بندی مکانیزم‌ها در انجام کارهای پیچیده، حرکتهای غیرخطی کنترل شده و انتقال نیرو، از جمله مسائل مورد توجه مهندسان می‌باشد. بطورکلی در طراحی یک مکانیزم و تعیین پارامترهای سینماتیکی آن برای سه کاربرد تلفیق[1] تولید تابع، تلفیق تولیدحرکت و تلفیق تولیدمسیر [۱]، روش تحلیلی و عددی منحصر بفردی وجود ندارد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تلفیق مکانیزم‌ها بکارگرفته‌شده‌است [۲-۵]. در روش‌های نگاره‌ای روش استفاده از اطلس منحنی‌های‌رابط[2] قابل ذکر می‌باشد، که توسط هرونس (Hrones) و نلسون (Nelson) انجام شده‌است [۲]. آنها این اطلس را برای مکانیزم‌های چهارمیله‌ای تا حدود ۱۰۰۰۰ منحنی گسترش‌دادند. همچنین شایان ذکر است که، روشی نیز توسط ژانگ (Zhang) برای مکانیزم‌های پنج‌میله‌ای ارائه شده‌است [۶]. با این‌که این‌روش‌ها ساده و سریع هستند اما از دقت پایینی برخوردارند بطوریکه نمی‌توانند در طراحی وسیع انواع متنوع مکانیزم‌ها، به ویژه وقتی تعداد نقاط دقت و پیچیدگی مسائل افزایش می‌یابد، مورد استفاده قرار-گیرند. به منظور از بین‌بردن این کمبودها، روش‌های بهینه‌سازی به طور فزاینده‌ای در سال‌های بعدتر برای تلفیق ابعادی مکانیزم‌ها مورد استفاده قرار گرفتند [۷-۹]. منابعی نیز در دست است که با استفاده از روش‌های تحلیلی به حل این مسائل پرداخته‌اند، اما این روش‌ها نیز در مورد تعداد محدودی از نقاط‌دقت کاربرد دارند و دارای مشکلاتی در زمینه ترتیب نقاط‌دقت پیموده‌شده توسط منحنی‌رابط نیز می‌باشند.

---

[1] Synthesis

[2] Coupler curves

۲-۱ مروری بر آثار گذشته

افزایش چشم‌گیر قدرت رایانه‌ها باعث توسعه روندهای جدیدی شده‌است که با روش‌های عددی برای کمینه‌کردن یک تابع هدف به‌کار می‌روند. یکی از نخستین کسانی که به مطالعه‌ی این‌گونه از روش‌ها پرداخته‌است، شخصی به نام هان (Han) می‌باشد [۱۰]، که دستاوردهایش در سالهای بعد توسطِ کارمر (Karmer)، سندر (Sandor)، سوهونی (Sohoni) و هاوگ (Haug) توسعه‌یافت [۱۱-۱۲]. آنها به بهینه‌سازی یکی از رایج‌ترین توابع هدف پرداخته‌اند که عبارتست از خطایی که میان نقاط طی‌شده توسط رابط و منحنی مورد نظر وجود دارد و در طی طراحی مکانیزم و بهینه‌سازی این تابع هدف، قیودی مانند شرایط گراشف، ترتیب زوایای ورودی و محدوده متغیرهای طراحی موجود بوده که باید ارضا شوند [۹]. روشهای بهینه‌سازی متفاوتی که برای تولید مکانیزم‌ها بکار می‌روند وجود دارند،که در مراجع و مقالات مختلف گزارش شده‌اند [۸و۹، ۱۳-۱۵]. اما تمامی این روش‌ها نیاز به محاسبات زیادی دارند. همچنین ممکن است که بعضی از این‌روش‌ها با پیداکردن یک نقطه‌ی کمینه‌ی محلی پایان یابند، بدون اینکه به نقطه‌ی بهینه‌ی واقعی برسند. در بین این روشها، انواع گوناگون الگوریتم‌های ژنتیکی بخاطرکارایی و احتمال بالایشان در پیداکردن نقطه بهینه واقعی به‌طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرارگرفته‌اند [۸و۹و۱۴،۱۶-۱۸]. اگرچه تمامی روشهای بهینه‌سازی موجود در مراجع قبلی که به آنها اشاره شده‌است براساس بهینه‌کردن یک تابع هدف(خطای مسیر) می‌باشند [۹] ولی در طراحی مکانیزم‌ها علاوه بر کمینه‌بودن خطای مسیر، توابع هدف دیگری نیز وجود دارند که دارای اهمیت‌اند. معمولا کمینه‌شدن خطای مسیر باعث بدترشدن این توابع هدف می‌شود. بنابراین لزوم بهینه‌سازی چندهدفی در طراحی مکانیزم‌ها کاملا احساس می‌شود. در مرجع [۱۹] نریمان‌زاده و همکارانش به بهینه‌سازی چند-هدفی مکانیزم‌ها از دید دو تابع هدف خطای‌پیمایش و زاویه‌انحراف پرداخته‌اند و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفی استفاده‌کرده‌اند. در اینگونه مسائل، چند تابع هدف مختلف تعریف می‌شوند، که تمایل به کمینه یا بیشینه‌کردن آن‌ها بطور همزمان وجود دارد. اغلب، این توابع‌هدف در نقطه مقابل یکدیگر قراردارند. بطوریکه بهبود در یکی از آنها به بدتر شدن تابع یا توابع هدف دیگر منجر می‌شود. بنابراین یک جواب بهینه که همه توابع هدف را به طور همزمان بهینه نماید وجود ندارد، بلکه بجای آن، یک سری جواب بهینه وجود دارند که به جواب‌های بهینه پارتو [۲۰] و یا منحنی پارتو (Pareto Front) معروف هستندکه این ویژگی، تفاوت اصلی در ماهیت کلی مسائل چندهدفی با مسائل تک‌هدفی می‌باشد [۲۱-۲۷] و این مجموعه پاسخ‌ها که پاسخ‌های تک‌هدفی را نیز شامل می‌شوند، روند طراحی و برگزیدن طرحی بهینه را روشن‌تر می‌سازند. روش‌های بهینه‌یابی بر پایه الگوریتم تکاملی با روش‌های بهینه‌یابی بر پایه ریاضیات، تفاوت دارند. تفاوت اصلی در این است که الگوریتم ژنتیک (GA) با جمعیتی از جواب ها سروکار دارد نه با یک جواب. و اگر گستردگی و پخش جمعیت‌ها مناسب باشد، از گرفتارشدن الگوریتم در نقاط بهینه محلی جلوگیری می‌نماید. این مزیت الگوریتم تکاملی جهت حل مسائل چندهدفی (MOPs) بسیار مفید است. اولین استفاده از جستجوی تکاملی در سال ۱۹۶۰ توسط رزنبرگ(Rosenberg) گزارش‌داده‌شده

[۲۸] و تاکنون جهت بهینه‌یابی مسائل چندتابع هدفی، در بسیاری از زمینه‌ها، الگوریتم‌های تکاملی مختلفی به وجود آمده‌اند [۲۹-۳۲]. دو موضوع مهم و قابل بحث در روش‌های بهینه‌یابی چند هدفی تکاملی وجوددارد [۳۲]:

۱- هدایت جستجو به سمت مجموعه جواب بهینه پارتو اصلی.

۲- جلوگیری از همگرائی زودرس یا نگهداری گستردگی جمعیت.

یکی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم NSGAII می‌باشدکه‌درسال۲۰۰۲ توسط دب(Deb) معرفی شده-است [۳۳]. این‌الگوریتم درحفظ تنوع جواب‌های بهینه، دارای اشکالاتی می‌باشد.

به همین منظور زیر برنامه ε-elimination [۳۴-۳۵] در این‌تحقیق برای حفظ گوناگونی و پخش جواب‌ها در تمامی حوزه حل پیشنهاد می‌گردد، که در این پایان‌نامه به طور کامل تشریح شده‌است، در این تحقیق الگوریتم اصلاح شده‌ی NSGAII برای بهینه‌سازی چندهدفی مکانیزم‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده‌است.

گستردگی روزافزون کاربرد مکانیزم‌های مختلف از جمله مکانیزم‌های چهار لینکی در دستگاه‌ها و ماشین‌آلات صنعتی و کشاورزی گوناگون، توجه ویژه به طراحی بهینه آنها را برای تولید مکانیزم‌هایی با کارایی بهتر و مقاوم‌تر با هزینه‌های کمتر رهنمون می‌نماید. در روش‌های سنتی بهینه‌سازی، اختلاف بین عملکرد مطلوب و عملکرد واقعی یک مکانیزم، کمینه شده‌است [۳۶-۳۹]. تلفیق سنتی مکانیزم قطعی و معین، هیچ‌گونه‌ای از موارد نامعین (شامل اتفاقی بودن ابعاد و تغییرات در نیروهای خارجی) [۴۰-۴۴] را در مکانیزم و محیط پیرامونش در نظر نمی‌گیرد. اما در حقیقت، موارد نامعین و غیرقطعی وجوددارند. کمیتهای فیزیکی‌ای که در مراحل مختلف طراحی در محاسبات وارد می‌شوند، به دلایل مختلفی مانند خطاهای اندازه‌گیری و یا خطا در اجرا و ساخت(تولرانس‌ها) و یا تغییرات ناشی از تغییردما و شرایط‌محیطی و یا عمرقطعه، مقادیر دقیقی نخواهند بود. بلکه بسته به میزان دقت در اندازه‌گیری و اجرا در بازه‌ای به دور مقادیر نامی خویش توزیع شده‌اند. از این خطای بین مقادیرنامی و واقعی، بعنوان نامعینی یاد می‌شود و بخاطر وجود این نامعینی‌ها، عملکرد واقعی مکانیزم در معرض تغییراتی در محدوده عملکرد طراحی‌شده قرارمی‌گیرد، طراحی با درنظرگرفتن نامعینی‌ها، طراحی مقاوم[1] نام دارد. طراحی مقاوم که توسط Taguchi [۴۵-۴۶] معرفی‌شد، یک روش طراحی قدرتمند برای رسیدن به کیفیت بالا و بهره‌وری می‌باشدکه با کنترل‌کردن متغیرهای طراحی، بدون محدودکردن عوامل نامعینی، به حداقل تغییرات در عملکرد می‌رسد [۴۷-۵۷].

هدف طراحی مقاوم، بهینه‌ساختن عملکرد میانگین و کمینه ساختن تغییرات و پراکندگی عملکرد بواسطه‌ی نامعینی‌هاست که سازنده می‌تواند با یافتن رابطه‌ی بین عملکرد میانگین و متغیرهای‌طراحی به این‌مقصود دست‌یابد. برقراری توازن و مصالحه بین پایداری و عملکرد سیستم در حضور نامعینی‌ها، یکی از چالشهای مهمی است که نظر مهندسین را به خود جلب‌کرده‌است.

[1] Robust Design

مصالحه باید بگونه‌ای باشدکه یک‌محصول، سطح قابل قبولی از پایداری و عملکرد مطلوب خود را با در نظرگرفتن نیرومندی[1] مناسب با توجه به نامعینی‌های موجود برای سیستمهای‌نامعین ایجادکند [۵۳].

هر مکانیزمی در معرض نامعینی‌هاست. نامعینی‌ها می‌توانند به فرم تولرانس‌های ابعادی در لینکها، لقی‌ها [۵۴] در اتصالات و غیره باشند. خروجی مکانیزم بخاطر نامعینی‌ها تحت تاثیر قرارگرفته‌است. روش‌های احتمالاتی، فازی و فاصله‌ای عموما برای مدلسازی نامعینی‌ها در یک سیستم مهندسی استفاده می‌شوند. روش احتمالاتی یک پارامتر نامعین را مانند یک متغیر تصادفی که از یک توزیع‌احتمالی پیروی‌می‌کند، توصیف می‌کند[۵۸-۶۲]. اگر اطلاعات برای ایجاد یک توزیع‌احتمالی کافی نباشد، دیدگاه فاصله‌ای یا تئوری‌فازی می‌تواند استفاده‌شود. در دیدگاه فاصله‌ای، نامعینی پارامتر توسط یک بازه ساده معلوم شده-است[۶۳-۶۴]. در تئوری‌فازی، مطلوبیت استفاده از مقادیرمختلف در بازه توسط یک تابع عضویت در بازه توصیف شده‌است [۶۵-۶۸]. دیدگاه‌فاصله‌ای وقتی که اطلاعات‌کافی در باره‌ی توزیع‌احتمالی متغیرنامعین وجود ندارد می‌تواند براحتی مورد استفاده قرارگیرد. اخیرا یک روش تلفیق مکانیزم مقاوم که نامعینی‌ها به صورت هر دو متغیر تصادفی و فاصله‌ای در نظرگرفته-شده‌اند، پیشنهادشده‌است[۶۹].

۱-۳ چکیده کار انجام شدخ در این تحقیق

عملکرد مکانیزمها در حالت تئوری و عملی متفاوت است. یکی از عوامل ایجاد این اختلاف وجود لقی در لولا می باشد. همانطوری که می دانیم هر لولا برای چرخش حول محور خود به مقدار کمی لقی نیاز دارد. که این مقدار لقی با توجه به طول عمر، گشتاورهای وارده، تلورانس ساخت و محل قرار گیری لولا به مرور زمان افزایش می یابد. که این امر باعث افزایش میزان خطا و نامطلوب شدن عملکرد مکانیزم می گردد. در نظر گرفتن نامعینی برای لقی لولا در بهینه سازی مکانیزم چهارلینکی یا به عبارت دیگر یررسی احتمالاتی، باعث نزدیکتر شدن عملکرد واقعی مکانیزم حاصل از بهینه سازی به مکانیزم پایه بدون لقی در حالت تئوری خواهد شد. و مکانیزم را در برابر تغییرات مقاومتر می گردد.

برای یافتن مسیر طی شده توسط مکانیزم با در نظر گرفتن لقی لولا می توان لقی لولا را با یک لینک مجازی که طولش برابر با مقدار لقی است مدلسازی کرد[۸۳]. با این کار درجه آزادی مکانیزم افزایش می یابد. و تنها با استفاده از معادلات سینماتیکی نمی توان مسیر پیموده شده توسط مکانیزم را تعیین کرد. از معادله لاگرانژ برای بدست آوردن مسیر کمک گرفته می شود. با حل معادله لاگرانژ حاکم بر مکانیزم می توان مسیر تولید شده توسط مکانیزم با لقی را تعیین کرد[۸۴]. در قسمت اول این

[1] Robustness

پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک دو هدفی اصلاح شده مکانیزم بهینه با وجود لقی لولای معین برای پیمایش مسیر هدف بررسی شده و نتایج با جواب حاصله مرجع [۵۴] مورد مقایسه قرار گرفته است.

بدون درنظرگرفتن نامعینی، نقاطی که بعنوان نقاط‌بهینه بدست می‌آیند ممکن است نسبت به وجود نامعینی در کمیتهای مرتبط، حساس بوده و به ازای تغییرات کمی در این کمیتها، تغییرات شدیدی در توابع هدف رخ‌داده، این نقاط را از حالت بهینه خارج‌سازد. با درنظرگرفتن نامعینی نقاط‌بهینه بدست‌آمده، نسبت به کمیتهایی که نامعینی را در آنها درنظرگرفته‌ایم حساسیت کمتری خواهندداشت و به اصطلاح نسبت به تغییرات مقاوم‌ترند. هر چند ممکن است بهینه بودن توابع هدف، کمتر از حالت اول باشد.

کاربردی که در این پایان‌نامه برای بهینه‌سازی مکانیزم چهار لینکی مدنظر است، تولید مسیرمعین با در نظرگرفتن نامعینی ناشی از لقی در اتصالات است، که در واقعیت وجوددارند. در این پایان‌نامه از روش شبیه‌سازی شبه مونت کارلو [۷۰] در بهینه-سازی چندهدفی استفاده شده‌است. استفاده از این روش برای مدل‌کردن نامعینی، بسیاری از محافظه‌کاریهای روشهای قبل (که در فصل پنجم این تحقیق به آنها اشاره شده‌است) را ندارد و به خاطر در نظرگرفتن تابع توزیع‌احتمالاتی به واقعیت نزدیکتر است. همچنین با استفاده از الگوریتم اصلاح شدهٔ NSGA-II [۳۴-۳۵] تمامی نقاط بهینهٔ طراحی از دید توابع هدف در اختیار طراح قرار گرفته‌اند و طراح با توجه به نیاز خود یکی از این نقاط را انتخاب می‌کند. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای رسیدن به پاسخ‌های‌بهتر و دقیق‌تر، علاوه بر استفاده از الگوریتم ژنتیک، از ترکیب آن با روش سیمپلکس، که روشی بر اساس گرادیان می‌باشد، نیز استفاده شده‌است.

انتظاری که از مکانیزم می‌رود این است که مکانیزم، در برابروجود نامعینی‌ها بهینه و مقاوم باشد. بهینه‌بودن از دید این پایان-نامه بدین‌معنی است که مکانیزم با در نظرگرفتن نامعینی‌های موجود، انحراف کمی از مسیر مطلوب داشته‌باشد. یعنی در مقایسه ۲مکانیزم، آنکه در برابر نامعینی‌های ناشی از لقی در اتصالات، خطای‌پیمایش کمتری از خود نشان‌داده و در عین حال دارای پراکندگی‌کمتر نیز باشد، برتر و کاراتر است. این مطلب در بخش نتایج به کمک ایجاد نمونه های احتمالاتی حول مکانیزم بهینه مرجع [۷۱] و مکانیزم بهینه با در نظر گرفتن نامعینی در لقی لولا و مقایسه با یکدیگر می توان مشاهده نمود.

همانطور که در این فصل به پیشینه مکانیزم‌ها پرداخته‌شد، دیدیم که پژوهشهای گوناگونی در زمینه بهینه‌سازی مکانیزم‌ها انجام پذیرفته و می‌پذیرد که هر یک بر بهبود کارایی مکانیزم در کاربردهای خاصی توجه‌دارند. دست‌آوردهای هر یک از این پژوهشها می‌تواند بعنوان راهنمایی برای طراحان در ساخت مکانیزمی کارا، در کاربرد مورد نظر باشد. بر این اساس ما نیز در این پایان‌نامه، به بهینه‌سازی کارایی مکانیزم برای تولید مسیر معین با در نظرگرفتن نامعینی پرداخته‌ایم.

۱-۴ روند پیش‌رو در این پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۷ فصل تنظیم شده که بخش حاضر، فصل اول پایان‌نامه، با عنوان پیشگفتار است.

در فصل دوم به تعریف ترکیب‌بندی مکانیزم‌ها پرداخته شده‌است. پس از بیان مقدمه‌ای راجع به روش‌های مختلف ترکیب بندی، به طراحی برای موقعیت میله رابط اشاره شده‌است. در ادامه منحنی‌های مربوط به نقاط‌واقع بر روی میله‌رابط مطرح خواهدشد، چون همانطور که در این پایان‌نامه نیز مطرح است، اغلب این خواسته مورد نظر است‌که مکانیزمی داشته باشیم که نقطه‌ای را در امتداد مسیری مشخص هدایت‌کند.

در فصل سوم الگوریتم‌های‌تکاملی، تعریف شده و اصول محاسبات آنها بیان‌شده‌است، در ادامه در مورد الگوریتم‌های ژنتیکی که دسته‌ای از الگوریتم‌های‌تکامل‌تدریجی می‌باشند به تفصیل بحث‌شده‌است.

در فصل ۴ به بحثهای مربوط به بهینه‌سازی واردمی‌شویم. بهینه‌سازی تک‌هدفی و چندهدفی و ویژگی‌های هر یک و برتری-های بهینه‌سازی چندهدفی بر تک‌هدفی مورد بحث قرار می‌گیرند، با انواع روشهای بهگزینی آشنا می‌شویم و الگوریتم‌های تکاملی را معرفی می‌نماییم. در نهایت به بیان چرایی به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک و چگونگی بهینه‌سازی چندهدفی بکمک این الگوریتم پرداخته شده‌است. در ادامه روند انجام کار و جزئیات مرتبط مسئله‌ی بهینه‌سازی با درنظرگرفتن نامعینی، بیان خواهد شد.

در فصل ۵ اهمیت درنظرگرفتن نامعینی و بررسی احتمالاتی مورد بررسی قرارگرفته شده‌است. در این فصل به چیستی نامعینی و چرایی بررسی احتمالاتی پرداخته‌شده و فواید بررسی احتمالاتی در بهینه‌سازی بیان‌شده‌است.

در فصل ۶ نتایج بدست‌آمده از اجرای برنامه‌های الگوریتم ژنتیک و بحث بر روی نتایج با درنظرگرفتن نامعینی آورده شده‌است.

در پایان نیز مقایسه‌ای بین نتایج این پایان‌نامه و مرجع [۵۴] انجام شده‌است.

فصل ۷، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه‌ی کار را دربردارد و مراجع نیز در ادامه آمده‌اند.