

دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

طراحی بهینه ای چندهدفی کنترلر مقاوم برای سیستم های  
غیرخطی دارای نامعینی با استفاده از الگوریتم های تکاملی

از:

امیر حاجیلو

استاد راهنما:

دکتر نادر نریمانزاده

شهریور ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم به پاس زحمات بی دریغشان

و همسر مهربانم، با عشق و احترام

تقدیر و تشکر از

دکتر نادر نریمانزاده

استاد بزرگواری که سالها تلاش و زحمات ایشان در تمام مراحل تحصیل و زندگی روشنگر  
راه من بوده‌اند. این پایان‌نامه و هر آنچه که در این راه کسب نموده‌ام نتیجه زحمات  
ایشان است.

دکتر کاظم آتشکاری

استاد عزیزم که با گفتار مهربانش آرامش را در این سالها به من هدیه کردند.

و با سپاس از همه دوستان عزیزم.

امیر حاجیلو

تابستان ۱۳۹۱

## فهرست مطالب

فهرست مطالب.....	ث
فهرست شکل ها .....	د
فهرست جدول ها .....	س
چکیده .....	ش
Abstract.....	ص
فصل اول - مقدمه .....	۱
۱.۱ پیشگفتار .....	۱
۲.۱ پیشینه کار .....	۲
۳.۱ ساختار پایان نامه .....	۴
فصل دوم - مروری بر کاربرد بهینه سازی چند هدفی در کنترل .....	۶
۱.۲ پیشگفتار .....	۶
۲.۲ بهینه سازی چند هدفی .....	۶
۳.۲ طراحی چند هدفی سیستم های کنترلی .....	۹
۴.۲ طراحی بر مبنای اولویت ها .....	۱۸
۵.۲ خلاصه فصل .....	۲۲
فصل سوم - تحلیل احتمالاتی و کنترل مقاوم .....	۲۳
۱.۳ پیشگفتار .....	۲۳
۲.۳ نامعینی احتمالاتی .....	۲۵
۱.۲.۳ توزیع احتمالاتی و تابع چگالی احتمالاتی .....	۲۵
۲.۲.۳ تابع توزیع جمعیت .....	۲۶
۳.۳ تحلیل احتمالاتی .....	۲۷
۱.۳.۳ متغیرهای تصادفی .....	۲۷
۲.۳.۳ فرآیندهای تصادفی .....	۳۱
۴.۳ نمونه برداری و شبیه سازی مونت کارلو .....	۳۲
۵.۳ عملکرد مقاوم .....	۳۸
۶.۳ خلاصه فصل .....	۳۸
فصل چهارم- سیستمهای کنترلی با مرتبه کسری .....	۳۹
۱.۴ پیشگفتار .....	۳۹

۴۰	..... حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری
۴۱	..... ۱.۲ تعاریف و ویژگیهای حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری
۴۳	..... ۲.۲ عملگر تبدیل انتگرال با مرتبه کسری
۴۳	..... ۳.۴ پایداری سیستمهای دارای مرتبه کسری
۴۶	..... ۴.۴ محاسبه مشتق با مرتبه کسری
۴۸	..... ۵.۴ حل معادلات دیفرانسیل با مرتبه کسری
۴۹	..... ۶.۴ کنترلر با مرتبه کسری
۵۰	..... ۱.۶ عملگر انتگرالی
۵۴	..... ۲.۶ عملگر مشتقگیر
۵۵	..... ۷.۴ کنترلرهای PID
۵۵	..... ۱.۷ کنترلر کلاسیک PID
۵۷	..... ۲.۷ کنترلر PID با مرتبه کسری
۵۸	..... ۸.۴ طراحی کنترلر FOPID
۶۱	..... ۹.۴ طراحی کنترلر مقاوم FOPID/IOPID با استفاده از بهینه سازی چند هدفی
۶۲	..... ۱.۹ مدل فرآیند
۶۲	..... ۲.۹ معیارهای طراحی
۶۶	..... ۳.۹ سیستم مرتبه صحیح-کنترلر مرتبه صحیح و کسری
۷۳	..... ۴.۹ سیستم مرتبه غیرصحیح-کنترلر مرتبه صحیح و کسری
۷۹	..... ۱۰.۴ طراحی کنترلر Fuzzy-FOPID
۸۰	..... ۱.۱۰ طراحی سیستم فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۸۳	..... ۲.۱۰ طراحی کنترلر Fuzzy-FOPID با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۸۹	..... ۱۱.۴ خلاصه فصل
۹۱	..... <b>فصل پنجم - خطی ساز فیدبک</b>
۹۱	..... ۱.۵ پیشگفتار
۹۲	..... ۲.۵ کنترلر خطی ساز فیدبک
۹۳	..... ۳.۵ طراحی کنترلر مقاوم خطی ساز فیدبک
۹۶	..... ۴.۵ نتایج بهینه سازی
۹۷	..... ۱.۴ طراحی معین
۹۹	..... ۲.۴ طراحی مقاوم

۱۰۹.....	۵. ۵ خلاصه فصل .....
۱۱۱.....	<b>فصل ششم - کنترل مد لغزشی .....</b>
۱۱۱.....	۱.۶ پیشگفتار .....
۱۱۲.....	۲.۶ سیستم های ساختار متغیر .....
۱۱۷.....	۳.۶ کنترل مد لغزشی .....
۱۱۹.....	۴.۶ طراحی کنترل مد لغزشی با لایه مرزی فازی .....
۱۱۹.....	۱.۴.۶ معادلات دینامیکی آونگ وارون .....
۱۲۱.....	۲.۴.۶ کنترلر مد لغزشی مجزا .....
۱۲۲.....	۳.۴.۶ طراحی بهینه کنترلر مد لغزشی با لایه مرزی ثابت .....
۱۲۷.....	۴.۴.۶ طراحی بهینه کنترلر مد لغزشی با لایه مرزی متغیر با زمان .....
۱۳۵.....	۵.۶ طراحی کنترل مد لغزشی پیش بین .....
۱۳۵.....	۱.۵.۶ کنترل پیش بین .....
۱۴۰.....	۲.۵.۶ کنترلر مد لغزشی بر مبنای پیش بینی لایه مرزی متغیر .....
۱۴۵.....	۷.۶ خلاصه فصل .....
۱۴۶.....	<b>فصل هفتم - نتیجه گیری و پیشنهادات .....</b>
۱۴۶.....	۱.۷ نتایج .....
۱۴۶.....	۱.۱.۷ کنترلر FOPID .....
۱۴۷.....	۲.۱.۷ خطی سازی فیدبک .....
۱۴۷.....	۳.۱.۷ کنترلر مد لغزشی .....
۱۴۸.....	۲.۷ پیشنهادات .....
۱۴۹.....	<b>پیوست الف - مروری بر تئوری پایداری سیستم های دینامیکی غیرخطی .....</b>
۱۴۹.....	الف. ۱ پیشگفتار .....
۱۵۰.....	الف. ۲ تئوری پایداری لیاپانوف .....
۱۵۲.....	الف. ۳ روش مستقیم لیاپانوف .....
۱۵۴.....	الف. ۴ پایداری سیستمهای غیرخودگردان .....
۱۵۶.....	<b>پیوست ب - طراحی کنترل مقاوم تطبیقی برای ربات 2R .....</b>
۱۵۶.....	ب. ۱ پیشگفتار .....
۱۵۷.....	ب. ۲ معادلات دینامیکی ربات .....
۱۵۸.....	ب. ۳ طراحی کنترل تطبیقی .....

ب. ۴ طراحی کنترل مد لغزشی تطبیقی..... ۱۶۳

ب. ۵ طراحی کنترل مد لغزشی تطبیقی با فیدبک خروجی..... ۱۶۷

مراجع..... ۱۷۷

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ سیستم گاورنر سرعت [۱]. ..... ۲
- شکل ۱-۲ جبهه پارتو حاصل از بهینه سازی دو هدفی. .... ۸
- شکل ۲-۲ سیستم دو جرم و فنر..... ۱۰
- شکل ۲-۳ دیاگرام های تراز جبهه پارتو و مجموعه پارتو با استفاده از  $1-norm$  ..... ۱۳
- شکل ۲-۴ دیاگرام های تراز جبهه پارتو و مجموعه پارتو با استفاده از  $2-norm$  ..... ۱۴
- شکل ۲-۵ دیاگرام های تراز جبهه پارتو و مجموعه پارتو با استفاده از  $\infty-norm$  ..... ۱۵
- شکل ۲-۶ پاسخ پله واحد. .... ۱۶
- شکل ۲-۷ (الف) پاسخ پله و (ب) دیاگرام Bode تابع تبدیل حلقه بسته و (ج) سیگنال کنترلی برای نقطه کمترین نرم اقلیدسی. .... ۱۸
- شکل ۲-۸ دیاگرام های تراز  $1-norm$  برای جبهه پارتو رنگی. .... ۲۰
- شکل ۲-۹ دیاگرام های تراز  $2-norm$  برای جبهه پارتو رنگی. .... ۲۱
- شکل ۲-۱۰ دیاگرام های تراز  $\infty-norm$  برای جبهه پارتو رنگی. .... ۲۱
- شکل ۳-۱ نامعینی کرداندار و نامعینی احتمالاتی. .... ۲۵
- شکل ۳-۲ احتمال بدست آمده با استفاده از مساحت زیر تابع  $fx$  ..... ۲۶
- شکل ۳-۳ منحنی PDF و CDF ..... ۲۷
- شکل ۳-۴ سیستم جرم-فنر-دمپر. .... ۲۸
- شکل ۳-۵ میزان فراوانی ماکزیمم فراجش. .... ۲۹
- شکل ۳-۶ منحنی CDF ماکزیمم فراجش. .... ۲۹
- شکل ۳-۷ منحنی تابع توزیع احتمالاتی و نواحی شکست. .... ۳۰
- شکل ۳-۸ پاسخ احتمالاتی سیستم جرم-فنر-دمپر. .... ۳۱
- شکل ۳-۹ نمایی از فرآیند تصادفی  $xh$  ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰ فرآیند شبیه سازی به روش مونت کارلو. .... ۳۳
- شکل ۳-۱۱ اعداد تصادفی تولید شده بین صفر و یک برای ۱۰۰ و ۵۰۰ نمونه. .... ۳۵
- شکل ۳-۱۲ (الف) نقاط و نمونه های تولید شده توسط روش مونت کارلو، (ب) نقاط و نمونه های تولید شده توسط روش همربسی. .. ۳۷
- شکل ۴-۱ سطوح ریمان برای  $W = S^{\frac{1}{3}}$  ..... ۴۴
- شکل ۴-۲ سطوح ریمانی برای  $W = S^{\frac{1}{3}}$  در صفحه اعداد مختلط. .... ۴۵
- شکل ۴-۳ ناحیه پایداری برای یک سیستم خطی با مرتبه کسری و  $0 < q \leq 1$  ..... ۴۵
- شکل ۴-۴ موقعیت قطبها در صفحه اعداد مختلط. .... ۴۶
- شکل ۴-۵ مشتق تابع  $f(t)$  به ازای اندازه گامهای مختلف. .... ۴۷
- شکل ۴-۶ مشتق مرتبه کسری تابع  $f(t) = e - 0.5t\sin 4t$ ، (الف) مشتق تابع در نظر گرفته شده به ازای  $a$  های مختلف و (ب) سطح حاصل از مشتق کسری تابع. .... ۴۷
- شکل ۴-۷ مشتق تابع به ازای دو تعریف مختلف. .... ۴۸
- شکل ۴-۸ دیاگرام بلوگی حلقه-بسته سیستم همراه با عملگر دارای مرتبه کسری. .... ۵۰
- شکل ۴-۹ سیگنال کنترلی به ازای مقادیر مختلف  $\mu$  و سیگنال خطای مربعی. .... ۵۱
- شکل ۴-۱۰ سیگنال کنترلی به ازای مقادیر مختلف  $\mu$  و سیگنال خطای دوزنقهای. .... ۵۵
- شکل ۴-۱۱ پاسخ فرکانسی کنترلر کلاسیک PID به ازای  $Kp = Ki = Kd = 1$  ..... ۵۶



- شکل ۴-۱۲ پاسخ فرکانسی کنترلر کلاسیک PID به ازای  $Kp = 1, Ki = 0.5, Kd = 1$  ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۳ پاسخ فرکانسی FOPID به ازای پارامترهای  $\lambda = \mu = 0.5$  و  $Kp = Ki = Kd = 1$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۴ حالت های مختلف FOPID و IOPID ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۵ قدر مطلق خطا. .... ۵۹
- شکل ۴-۱۶ پاسخ پله سیستم به ازای کنترلرهای طراحی شده به روش اول. .... ۶۰
- شکل ۴-۱۷ پاسخ پله سیستم به ازای کنترلرهای طراحی شده به روش دوم. .... ۶۱
- شکل ۴-۱۸ ساختار کنترلی حلقه-بسته. .... ۶۲
- شکل ۴-۱۹ تصویر شماتیک درجه پایداری. .... ۶۳
- شکل ۴-۲۰ دیاگرام تراز جبهه پارتو برای هر دو کنترلر IOPID و FOPID به ازای تابع تبدیل مرتبه صحیح. .... ۶۷
- شکل ۴-۲۱ مقادیر میانگین توابع هدف نرمالیزه شده. .... ۶۸
- شکل ۴-۲۲ مقادیر واریانس توابع هدف نرمالیزه شده. .... ۶۹
- شکل ۴-۲۳ رفتار تصادفی پاسخ پله واحد سیستم (الف) IOPID و (ب) FOPID. .... ۷۰
- شکل ۴-۲۴ تابع توزیع احتمالاتی برای متغیر تصادفی ITSE به ازای کنترلرهای IOPID و FOPID متناظر با نقاط مصالحه. .... ۷۰
- شکل ۴-۲۵ مقایسه عملکرد مقاوم دو کنترلر انتخابی IOPID و FOPID، (الف) زمان نشست و (ب) فراجش. .... ۷۱
- شکل ۴-۲۶ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه-بسته به ازای کنترلر مصالحه IOPID. .... ۷۱
- شکل ۴-۲۷ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه-بسته به ازای کنترلر مصالحه FOPID. .... ۷۲
- شکل ۴-۲۸ رفتار تصادفی پاسخ سیستم به ازای ضربه واحد برای نقطه مصالحه (الف) IOPID و (ب) FOPID. .... ۷۲
- شکل ۴-۲۹ دیاگرام تراز جبهه پارتو برای هر دو کنترلر IOPID و FOPID به ازای تابع تبدیل مرتبه غیر صحیح. .... ۷۳
- شکل ۴-۳۰ مقادیر میانگین توابع هدف نرمالیزه شده. .... ۷۴
- شکل ۴-۳۱ مقادیر واریانس توابع هدف نرمالیزه شده. .... ۷۵
- شکل ۴-۳۲ رفتار تصادفی پاسخ پله واحد سیستم (الف) IOPID و (ب) FOPID. .... ۷۶
- شکل ۴-۳۳ تابع توزیع احتمالاتی برای متغیر تصادفی ITSE به ازای کنترلرهای IOPID و FOPID متناظر با نقاط مصالحه. .... ۷۶
- شکل ۴-۳۴ مقایسه عملکرد مقاوم دو کنترلر انتخابی IOPID و FOPID، (الف) زمان نشست و (ب) فراجش. .... ۷۷
- شکل ۴-۳۵ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه-بسته به ازای کنترلر مصالحه IOPID. .... ۷۷
- شکل ۴-۳۶ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه-بسته به ازای کنترلر مصالحه FOPID. .... ۷۸
- شکل ۴-۳۷ رفتار تصادفی پاسخ سیستم به ازای ضربه واحد برای نقطه مصالحه (الف) IOPID و (ب) FOPID. .... ۷۸
- شکل ۴-۳۸ چیدمان توابع عضویت با  $PS$  های متفاوت. .... ۸۱
- شکل ۴-۳۹ ساختار قوانین فازی. .... ۸۲
- شکل ۴-۴۰ ساختار کنترلر پیشنهادی Fuzzy-FOPID. .... ۸۳
- شکل ۴-۴۱ دیاگرام تراز جبهه پارتو کنترلر Fuzzy-FOPID. .... ۸۴
- شکل ۴-۴۲ رفتار تصادفی پاسخهای پله واحد سیستم برای نقطه مصالحه. .... ۸۶
- شکل ۴-۴۳ رفتار احتمالاتی مربوط به متغیرهای تصادفی (الف) زمان نشست و (ب) فراجش. .... ۸۶
- شکل ۴-۴۴ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه-بسته به ازای کنترلر مصالحه Fuzzy-FOPID. .... ۸۷
- شکل ۴-۴۵ رفتار تصادفی پاسخ فرکانسی در  $\omega = 100 \text{ rad/sec}$ . .... ۸۷
- شکل ۴-۴۶ رفتار تصادفی پاسخ سیستم به ازای ضربه واحد. .... ۸۸
- شکل ۴-۴۷ سطوح فازی مربوط به هریک از کنترلرهای فازی برای نقطه مصالحه. .... ۸۹
- شکل ۵-۱ ساختار خطی ساز فیدبک [۶۰]. .... ۹۲

- شکل ۵-۲ سیستم دو جرم و فنر..... ۹۴
- شکل ۵-۳ نتایج حاصل از بهینه سازی طراحی معین..... ۹۷
- شکل ۵-۴ جابجایی جرم ۲ به ازای نقاط بهینه انتخابی..... ۹۸
- شکل ۵-۵ سیگنال کنترلی متناظر با نقاط انتخابی..... ۹۹
- شکل ۵-۶ پاسخ زمانی هر یک از متغیرهای حالت..... ۹۹
- شکل ۵-۷ نتایج حاصل از طراحی مقاوم با توزیع نرمال..... ۱۰۱
- شکل ۵-۸ پاسخ تصادفی مربوط به نقاط انتخابی با توزیع نرمال..... ۱۰۳
- شکل ۵-۹ منحنیهای PDF برای متغیرهای تصادفی به ازای توزیع نرمال..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۰ نتایج حاصل از طراحی مقاوم با توزیع یکنواخت..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۱ پاسخ تصادفی مربوط به نقاط انتخابی با توزیع یکنواخت..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۲ منحنیهای PDF برای متغیرهای تصادفی به ازای توزیع یکنواخت..... ۱۰۸
- شکل ۶-۱ (الف) و (ب) پیکره فازی با در نظر گرفتن ساختار ثابت و (ج) پیکره فازی سیستم دارای ساختار متغیر [۶۱]..... ۱۱۳
- شکل ۶-۲ پیکره فازی سیستم ساختار متغیر..... ۱۱۴
- شکل ۶-۳ پیکره فازی سیستم دارای دو انتگرالگیر..... ۱۱۵
- شکل ۶-۴ پیکره فازی سیستم حلقه-بسته به ازای شرایط اولیه مختلف..... ۱۱۵
- شکل ۶-۵ تصویر بزرگنمایی شده از پدیده لرزش در سیستمهای ساختار متغیر..... ۱۱۶
- شکل ۶-۶ پدیده لرزش در پیکره فازی سیستم (۶-۴) با در نظر گرفتن سیگنال کنترلی (۶-۷)..... ۱۱۶
- شکل ۶-۷ نمایش شرط لازم برای جذب بودن یک سطح لغزش..... ۱۱۷
- شکل ۶-۸ آونگ وارون..... ۱۲۰
- شکل ۶-۹ نتایج حاصل از بهینه سازی با ۳ تابع هدف..... ۱۲۴
- شکل ۶-۱۰ شبیه سازی نقاط حاصل از بهینه سازی، (الف) زاویه آونگ، (ب) مکان گاری و (پ) سیگنال کنترلی..... ۱۲۵
- شکل ۶-۱۱ متغیرهای (الف)  $z$ ، (ب)  $S_1$  و (پ)  $S_2$  برای نقطه دارای کمترین  $J_2$ ..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۲ نتایج حاصل از بهینه سازی با ۳ تابع هدف..... ۱۲۹
- شکل ۶-۱۳ پاسخ سیستم به ازای کنترلر نقطه مصالحه، (الف) زاویه آونگ، (ب) مکان گاری و (پ) سیگنال کنترلی..... ۱۳۰
- شکل ۶-۱۴ متغیرهای (الف)  $z$ ، (ب)  $S_1$  و (پ)  $S_2$  برای نقطه مصالحه..... ۱۳۱
- شکل ۶-۱۵ نتایج شبیه سازی برگرفته از مرجع [۶۶]..... ۱۳۲
- شکل ۶-۱۶ نتایج بهینه سازی با در نظر گرفتن اولویتها..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۷ توابع عضویت (الف)  $S_1$ ، (ب)  $S_1$  و (پ)  $fb$  برای نقطه مصالحه..... ۱۳۴
- شکل ۶-۱۸ سطح فازی مربوط به نقطه مصالحه..... ۱۳۴
- شکل ۶-۱۹ استراتژی کنترل پیش بین [۷۶]..... ۱۳۷
- شکل ۶-۲۰ نمایشی از استراتژی کنترل پیش بین [۷۷]..... ۱۳۷
- شکل ۶-۲۱ ساختار شبکه RBFN..... ۱۳۹
- شکل ۶-۲۲ ساختار کنترلر پیشنهادی..... ۱۴۰
- شکل ۶-۲۳ (الف) ورودی و (ب) خروجی شبکه عصبی..... ۱۴۲
- شکل ۶-۲۴ سطح لغزش به همراه لایه مرزی متغیر با زمان..... ۱۴۲
- شکل ۶-۲۵ زاویه آونگ ( $rad/sec$ )..... ۱۴۳
- شکل ۶-۲۶ سیگنال کنترلی ( $N$ )..... ۱۴۳

شکل ۶- ۲۷ مقایسه خطای پیمایش.....	۱۴۴
شکل ۶- ۲۸ مقایسه سطح لغزش.....	۱۴۴
شکل الف- ۱ پایداری لیپانوف یک نقطه تعادل [۷۹].....	۱۵۱
شکل الف- ۲ پایداری مجانبی یک نقطه تعادل [۷۹].....	۱۵۱
شکل الف- ۳ نقطه تعادل در حالت های پایداری مجانبی، پایدار لیپانوف و ناپایدار [۷۹].....	۱۵۱
شکل الف- ۴ (الف) تابع لیپانوف انتخایی، (ب) لیپانوف با سطوح انرژی ثابت [۶۰].....	۱۵۳
شکل الف- ۵ تابع $K_{\infty}$ .....	۱۵۴
شکل ب- ۱ ربات $2R$ .....	۱۵۷
شکل ب- ۲ موقعیت مکانی مفصل های ربات.....	۱۶۱
شکل ب- ۳ سرعت زاویه ای مفصل های ربات.....	۱۶۱
شکل ب- ۴ پارامترهای تخمین زده شده.....	۱۶۲
شکل ب- ۵ گشتاور اعمالی به ربات $(N.m)$ .....	۱۶۳
شکل ب- ۶ موقعیت مکانی مفصل های ربات.....	۱۶۵
شکل ب- ۷ سرعت زاویه ای مفصل های ربات.....	۱۶۵
شکل ب- ۸ پارامترهای تخمین زده شده.....	۱۶۶
شکل ب- ۹ سطوح لغزش.....	۱۶۶
شکل ب- ۱۰ گشتاور اعمالی به ربات $(N.m)$ .....	۱۶۷
شکل ب- ۱۱ ساختار مشاهده گر خطی.....	۱۶۸
شکل ب- ۱۲ ساختار کنترلر.....	۱۶۸
شکل ب- ۱۳ نتایج بهینه سازی با ۳ تابع هدف.....	۱۷۰
شکل ب- ۱۴ خطای پیمایش به ازای نقاط بهینه.....	۱۷۱
شکل ب- ۱۵ خطای مشاهده گر به ازای نقاط بهینه.....	۱۷۱
شکل ب- ۱۶ گشتاور اعمالی به ربات به ازای نقاط بهینه.....	۱۷۲
شکل ب- ۱۷ موقعیت مکانی مفصل های ربات.....	۱۷۲
شکل ب- ۱۸ سرعت زاویه ای مفصل های ربات.....	۱۷۳
شکل ب- ۱۹ گشتاور اعمالی به ربات $(N.m)$ .....	۱۷۳
شکل ب- ۲۰ پارامترهای تخمین زده شده.....	۱۷۴
شکل ب- ۲۱ سطوح لغزش با استفاده از سرعت تخمین زده شده.....	۱۷۴
شکل ب- ۲۲ خطای مشاهده گر سرعت.....	۱۷۵
شکل ب- ۲۳ موقعیت مکانی مفصل های ربات.....	۱۷۶

## فهرست جدول ها

جدول ۵-۱	نقاط بهینه انتخابی برای طراحی معین.	۹۸
جدول ۵-۲	پارامترهای توزیع نرمال برای نامعینیهای سیستم.	۱۰۰
جدول ۵-۳	نقاط بهینه انتخابی برای طراحی مقاوم با توزیع نرمال.	۱۰۲
جدول ۵-۴	نقاط بهینه انتخابی برای طراحی مقاوم با توزیع یکنواخت.	۱۰۵
جدول ۵-۵	مقایسه میزان مقاومت کنترلرهای مختلف.	۱۰۸
جدول ۶-۱	پارامترهای آونگ وارون.	۱۲۰
جدول ۶-۲	مقادیر پارامترهای بهینه و توابع هدف.	۱۲۴
جدول ۶-۳	مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف.	۱۲۹
جدول ۶-۴	جدول اولویت بندی برای سیستم آونگ وارون.	۱۳۲
جدول ۷-۵	پارامترهای ربات.	۱۵۸
جدول ۷-۶	جدول اولویت بندی برای ربات 2R.	۱۶۹
جدول ۷-۷	مقادیر پارامترهای بهینه و توابع هدف.	۱۷۰
جدول ب-۱	پارامترهای ربات.	۱۵۸
جدول ب-۲	جدول اولویت بندی برای ربات 2R.	۱۶۹
جدول ب-۳	مقادیر پارامترهای بهینه و توابع هدف.	۱۷۰

طراحی بهینه‌ای چندهدفی کنترلر مقاوم برای سیستم‌های غیرخطی دارای نامعینی با استفاده از

الگوریتم‌های تکاملی

امیر حاجیلو

در این پایان‌نامه طراحی کنترلر مقاوم بهینه‌ای برای سیستم‌های غیرخطی دارای نامعینی با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این پایان‌نامه بهره‌گیری از روش‌های هوشمند به همراه بهینه‌سازی چند هدفی جهت بالابردن عملکرد سیستم‌های کنترلی می‌باشد. بدین منظور روش‌های مختلف نظیر کنترلرهای مرتبه کسری، خطی ساز فیدبک و مدل‌غزشی استفاده شده است. برای به دست آوردن پارامترهای بهینه‌ای کنترلرها چندین تابع هدف، با توجه به نوع سیستم در نظر گرفته شده است. همچنین سیستم‌های در نظر گرفته شده دارای نامعینی می‌باشند، بنابراین طراحی کنترلر باید بگونه‌ای باشد که سیستم در حضور نامعینی‌های دارای پایداری و عملکرد مناسبی باشد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفی و طراحی مقاوم به طراح این امکان را می‌دهد تا با برقراری مصالحه بین توابع هدف نقطه مناسب طراحی را انتخاب نماید. همچنین با بهره‌گیری از روش‌های هوشمند نظیر منطق فازی عملکرد هر یک از روش‌های کنترلی افزایش داده می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های ارائه شده با روش‌های معمول، به خوبی برتری روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** کنترلر مقاوم، کنترل مرتبه کسری، کنترل مدل‌غزشی، خطی ساز فیدبک، بهینه‌سازی چندهدفی.

## Abstract

### **Multi-objective Optimal Robust Controller Design for Uncertain Nonlinear Systems using Evolutionary Algorithms**

**Amir Hajiloo**

In this thesis the optimal robust controller design for nonlinear uncertain systems will be investigated by multi-objective optimization. The aim of this thesis is using intelligent methods with multi-objective optimization to enhance the performance of the conventional control methods. Different methods such as fractional order controller, feedback linearization, and sliding mode will be used for this purpose. Also, the considered plants are uncertain, therefore, the controller should be designed robustly in order to cope with the uncertainty effects. The obtained results lead to discovering the trade-off between objective functions. Also, using intelligent methods such as fuzzy logic cause to increase the performance of each control method. The results show the supremacy of the proposed method in comparison with conventional ones.

**Keywords:** Robust Control, Fractional Order Controller, Sliding Mode Control, Feedback Linearization, Multi-Objective Optimization.

---

## مقدمه



*"They know enough who know how to learn."  
- Henry Brooks Adams*

### ۱.۱ پیشگفتار

امروزه پیشرفتهای موجود در هوش مصنوعی<sup>۱</sup> (AI)، محاسبات نرم<sup>۲</sup> و سایر علوم مربوط به این زمینه‌ها، به همراه افزایش توان محاسباتی کامپیوترها، به مهندسين کنترل این امکان را می‌دهند تا بر بسیاری از چالش‌های موجود در طراحی کنترلر برای سیستم‌های پیچیده و نامعین غلبه نمایند. چالش‌هایی که با استفاده از روش‌های سنتی که اغلب مبتنی بر دانش کافی ریاضی و مدل دقیق سیستم می‌باشند، امکان برطرف کردن آنها فراهم نمی‌باشد. در دنیای واقعی سیستم‌هایی را می‌توان یافت که به دلیل پیچیدگی بالا و عدم توانایی در شناسایی برخی از پارامترهای آن امکان به دست آوردن مدل دقیق ریاضی برای آنها فراهم نمی‌باشد، اما کنترل و بهینه‌سازی رفتار آنها به شدت مورد نیاز است [۱]. بنابراین دستیابی به روش‌های کنترلی مدرن که دارای مقاومت بالا و رفتاری بهینه باشند، نیاز دنیای پیشرفته امروز است و محققین تلاش‌های بسیار زیادی در این زمینه نموده‌اند. تلاش‌هایی که منجر به ارسال ماهواره‌ها و موشک‌ها به فضا شده است. اگرچه روزی اختراع گاورنر سرعت<sup>۳</sup> برای ماشین بخار توسط جیمز وات<sup>۴</sup> حیرت همگان را برانگیخت (شکل ۱-۱)، اما پیشرفت‌های دنیای امروز استفاده از سیستم کروز کنترل را به صورت بخشی ضروری برای هر خودروی مدرن تبدیل کرده‌اند.

دو نکته را می‌توان به عنوان ویژگی‌های مهم یک کنترلر مدرن در نظر گرفت. یکی بهینه بودن رفتار آن و دیگری مقاوم بودن آن در حضور نامعینی‌ها می‌باشد. بطور طبیعی اگر قرار باشد برای انجام کاری از میان راه‌حل‌های موجود یکی را انتخاب کنیم، همیشه انتخاب "بهترین" جواب ممکن، مطلوب هر شخصی است. فرآیند پیدا کردن بهترین جواب ممکن با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی امکان پذیر می‌باشد. در این فرآیند اغلب یک یا چند "مشخصه عملکرد" یا "تابع هدف" توسط طراح

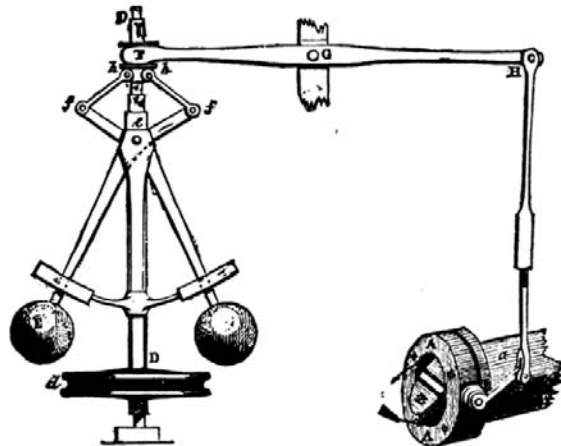
---

<sup>1</sup> Artificial Intelligence

<sup>2</sup> Soft computing

<sup>3</sup> Speed Governor

<sup>4</sup> James Watt



شکل ۱-۱ سیستم گاورنر سرعت [۱].

تعریف می شود سپس با استفاده از روش‌های موجود بهینه سازی با کمینه کردن آنها مقدار بهینه در میان تمامی پاسخ‌های موجود به دست می آید. برای سیستم‌های خطی، تئوری کنترل بهینه به خوبی گسترش یافته است. همانند روش‌های  $\mathcal{H}_2$  و  $\mathcal{H}_\infty$  که از لحاظ تئوری و محاسباتی برای سیستم‌های خطی بسیار مناسب می‌باشند. از طرف دیگر استفاده از روش‌های مبتنی بر ریاضی برای سیستم‌های غیرخطی که خود دارای معادلات پیچیده ریاضی می‌باشند، اغلب کار بسیار دشواری است. حال تصور کنیم که این سیستم غیرخطی که باید برای آن کنترلر بهینه طراحی شود، دارای نامعینی نیز باشد. در این شرایط استفاده از روش‌های تحلیلی کار بسیار دشواری خواهد بود. بنابراین استفاده از روش‌های عددی موجود در بهینه‌سازی، نظیر الگوریتم‌های تکاملی که اغلب از رویدادهای طبیعی الهام گرفته شده اند، امروزه مورد توجه بسیاری محققین در بهینه‌سازی می‌باشند. همچنین استفاده از تحلیل احتمالاتی برای طراحی کنترلر مقاوم نیز بسیار گسترش یافته است. مراجع بسیاری را می‌توان یافت که در آن با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و تحلیل احتمالاتی برای سیستم‌های نامعین، کنترلر بهینه مقاوم طراحی نموده‌اند [۲-۷]. روش‌های ارائه شده اغلب درباره طراحی کنترلرهای خطی برای سیستم‌های خطی نامعین می‌باشند.

بنابراین هدف اصلی این پایان نامه ارائه روش‌هایی جهت بالا بردن مقاومت و عملکرد سیستم‌های کنترل غیرخطی برای سیستم‌های نامعین می‌باشد. استفاده از روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های تکاملی به همراه بهینه‌سازی چند هدفی از ابزارهای استفاده شده در این پایان نامه می‌باشند.

## ۲.۱ پیشینه کار

در طی سال‌های اخیر با پیشرفت ابزارهای محاسباتی به ویژه پردازنده‌های چند هسته‌ای استفاده از روش‌های عددی در مهندسی افزایش یافته است. مهندسين کنترل نیز از این پیشرفت‌ها بی بهره نبوده‌اند. در دهه های اخیر استنجل<sup>۵</sup> و همکارانش روشی را جهت طراحی کنترلر مقاوم بر مبنای تحلیل احتمالاتی ارائه کردند که به دلیل انعطاف پذیری بالا بسیار مورد توجه محققین

<sup>5</sup> Stengel



قرار گرفته است [۴-۷]. این روش که به نوع سیستم و نوع کنترلر وابسته نمی‌باشد، این امکان را فراهم می‌سازد که طراح از ساختارهای مختلف در طراحی کنترلر مقاوم برای سیستم‌هایی که پارامترهای آنها دارای نامعینی باشند، استفاده کند. در این تحلیل برخلاف روش‌های متداول کنترل مقاوم، پارامترهای سیستم دارای نامعینی احتمالاتی می‌باشند، به همین دلیل به آن تحلیل احتمالاتی می‌گویند. در این زمینه فعالیت‌های گسترده‌ای به ویژه در طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم خطی انجام شده است. به عنوان مثال استنجل در سال ۱۹۹۸ چگونگی طراحی جبران‌ساز را برای یک سیستم خطی ارائه کرد [۵]. در این روش از الگوریتم ژنتیک جهت به دست آوردن پارامترهای مقاوم و بهینه سیستم کنترلی استفاده شده است. نکته‌ای که لازم است در طراحی کنترلر مقاوم در نظر گرفته شود این است که سیستم باید پایداری و عملکرد مقاوم را بطور همزمان دارا باشد. این نکته در روش استنجل در قالب یک تابع هدف در نظر گرفته می‌شود [۷]. یعنی پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم که اغلب شامل مشخصه‌هایی نظیر زمان نشست، فراجش و سیگنال کنترلی می‌باشد با ضرایب وزنی متفاوت در یک تابع هدف با یکدیگر جمع می‌شوند و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک مینیمم این تابع هدف پیدا می‌شود. اما این ابهام باقی می‌ماند که ضریب وزنی برای هر یک از مولفه‌های تابع هدف چقدر باشد. شاید به دلیل اهمیت بالای پایداری بتوان ضریب وزنی آن را بالا در نظر گرفت، اما در مورد دیگر مشخصه‌ها کماکان این پرسش مطرح خواهد بود که مناسبترین ضریب چند می‌باشد. این ابهام باعث ارائه روشی توسط نریمان‌زاده و همکارانش شد که در آن از بهینه‌سازی چند هدفی جهت طراحی کنترل مقاوم بهینه استفاده شد. از این روش در طراحی کنترل مقاوم خطی برای سیستم‌های مختلف استفاده شده که نتایج آن در مراجع [۲، ۳، ۸، ۹] ارائه شده است. اما این روش در سیستم‌های غیرخطی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. استنجل و همکارانش در سال ۲۰۰۲ از روش خود جهت طراحی کنترل مقاوم خطی‌ساز فیدبک استفاده نمودند [۷]. در اینجا نیز همانند قبل سعی شد تا با یک تابع هدف بطور همزمان پایداری و عملکرد مقاوم را ایجاد نمایند. ایده مورد استفاده توسط دکتر نریمان‌زاده و همکارانش در این پایان‌نامه جهت طراحی کنترلر مقاوم بهینه برای سیستم‌های غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ایده در اولین گام برای کنترلر خطی‌ساز فیدبک جهت مقایسه با روش استنجل بررسی می‌شود. اما روش‌های کنترل غیرخطی محدود به این روش نمی‌شوند.

یکی از روش‌های نوین کنترلی که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، کنترلرهایی با مرتبه کسری می‌باشند. این روش به دلیل آنکه در سالهای اخیر ارائه شده است، هنوز روش‌های طراحی آن بویژه طراحی مقاوم و بهینه آن گسترش نیافته است. به مراجع [۱۰-۱۶] می‌توان اشاره نمود که در آنها روش‌های مختلفی جهت طراحی این کنترلرها ارائه شده است. به عنوان مثال در مرجع [۱۶] روشی ارائه شده است که در آن با استفاده از PSO<sup>۶</sup> و تنها با یک تابع هدف که متشکل از چندین معیار طراحی در حوزه زمان و فرکانسی می‌باشد، کنترلر PID با مرتبه کسری طراحی می‌شود. در اینجا نیز طراح امکان برقراری مصالحه بین

<sup>۶</sup> Particle Swarm Optimization

توابع هدف را نخواهد داشت. همچنین بحث مقاوم بودن این کنترلر در این مرجع نادیده گرفته شده است. در این پایان نامه سعی می‌شود تا با بهره‌گیری از روش‌های هوش مصنوعی و محاسبات نرم علاوه بر دستیابی به یک طراحی بهینه، کنترلرهای مرتبه کسری مقاوم نیز طراحی شوند.

کنترلر مدلغزشی از جمله سیستم‌های کنترلی مقاوم پرکاربرد می‌باشد که در مهندسی کنترل بسیار کاربرد دارد. این کنترلر به دلیل ساختار ویژه، دارای توانایی بالا در حذف اثرات اغتشاش و نامعینی می‌باشد. عملکرد این کنترلر نیز همانند دیگر ساختارهای کنترلی به شدت به پارامترهای آن بستگی دارد. لذا روش‌های بسیاری توسط محققین ارائه شده است تا عملکرد این کنترلر را افزایش دهند [۱۷-۲۲]. در نظر گرفتن لایه مرزی متغیر با زمان یکی از روش‌هایی است که نقش مهمی در افزایش عملکرد این سیستم دارد. به عنوان مثال مرجع [۲۰] نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن لایه مرزی به صورت فازی، عملکرد کنترلر مدلغزشی را می‌توان در مقایسه با لایه مرزی ثابت افزایش داد. در این مرجع نویسنده با توجه به دانش و آگاهی نسبت به سیستم در نظر گرفته شده، قوانین فازی را طراحی نموده است. در نتیجه این امکان وجود دارد که با انتخاب قوانین فازی بگونه‌ای دیگر، به سیستمی با عملکرد بهتر دست پیدا نمود. بنابراین هدف دیگر این پایان نامه ارائه روشی است که در آن با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفی، لایه مرزی متغیر با زمان، به صورت فازی برای سیستمی نامعین طراحی شود.

### ۱.۳ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه تلاش می‌شود علاوه بر بالا بردن مقاومت و عملکرد سیستم‌های کنترلی موجود، روش‌های نوین نیز ارائه شود. در این پایان نامه دو دسته کنترلر غیرخطی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. دسته اول کنترلرهایی که مقاوم نیستند و دسته دوم کنترلرهایی که بطور ذاتی مقاوم می‌باشند. همچنین برای هر دو دسته روش‌های جدیدی ارائه می‌شود که در مقایسه با آنچه متداول است از مقاومت و عملکرد بالاتری برخوردار باشند.

همانگونه که اشاره شد، نوآوری این پایان نامه استفاده از روش‌های هوشمند بویژه منطق فازی در بالا بردن عملکرد سیستم‌های کنترلی موجود می‌باشد. همچنین از بهینه‌سازی چند هدفی جهت یافتن پارامترهای بهینه کنترلرها استفاده می‌شود. برای رسیدن به اهداف این پایان نامه، در ابتدا نیاز است که با بهینه‌سازی چند هدفی و بویژه کاربردهای آن در مهندسی کنترل آشنا شویم. بدین منظور فصل دوم این پایان نامه به بررسی بهینه‌سازی چندهدفی می‌پردازد. چگونگی طراحی یک کنترلر خطی با در نظر گرفتن چند تابع هدف در این فصل ارائه می‌شود. از آنجاییکه جهت طراحی کنترلرهای این پایان نامه چندین تابع هدف در نظر گرفته شده است، چگونگی نمایش و بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی نیز از دیگر مباحث مطرح شده در این فصل می‌باشد.

در فصل سوم مفاهیم طراحی کنترلر مقاوم به روش تحلیل احتمالاتی ارائه می‌شود. این فصل که شامل مباحث احتمالاتی می‌باشد، زمینه طراحی کنترلر مقاوم بهینه را برای سیستم‌های غیرخطی دارای نامعینی فراهم می‌سازد. بنابراین ابتدا مفاهیم

آماري نظير تابع توزيع احتمالاتي و تابع توزيع جمعيتي که در تحليل احتمالاتي کاربرد دارند، بررسي مي‌شوند. سپس مدل‌سازي سيستم‌هاي نامعين به روش مونت کارلو و شبه مونت کارلو مورد بررسي قرار مي‌گيرد.

مباحث مربوط به حساب ديفرانسيل و انتگرال کسري و کاربرد آن براي مهندسي کنترل در فصل چهارم مورد بررسي قرار مي‌گيرد. سپس چگونگي طراحي مقاوم و بهينه کنترلرهاي مرتبه کسري با استفاده از بهينه‌سازي چندهدفي و الگوريتم ژنتيک ارائه مي‌شود. همچنين با بهره‌گيري از روش‌هاي هوشمند نظير فزي عملکرد اين سيستم‌هاي کنترلي را افزايش مي‌دهيم.

ساختار کنترلي ديگري که در اين پايان نامه بررسي مي‌شود و همانند کنترلرهاي مرتبه کسري مربوط به دسته اول مي‌باشد، کنترلر خطي ساز فيدبک مي‌باشد. اين کنترلر که بطور طبيعي از مقاومت کمي در مقابل نامعيني‌ها برخوردار مي‌باشد، در فصل پنجم چگونگي طراحي مقاوم آن به روش تحليل احتمالاتي و بهينه‌سازي چندهدفي ارائه مي‌شود. نتايج حاصل با روش‌هاي متداول مقايسه مي‌شود.

کنترلر مد لغزشي که از دسته کنترلرهاي مقاوم مي‌باشد در فصل ششم مورد بررسي قرار مي‌گيرد. چگونگي طراحي بهينه آن با استفاده از بهينه‌سازي چند هدفي و همچنين افزايش عملکرد آن با در نظر گرفتن لايه مرزي متغير با زمان از مباحث مطرح شده در اين فصل مي‌باشد. همچنين با بهره‌گيري از روش کنترلر پيشگو، روش نويني جهت طراحي کنترلر مد لغزشي در اين پايان نامه ارائه مي‌شود. علاوه بر آن با استفاده از کنترلر تطبيقي سعی مي‌شود تا عملکرد کنترلر مد لغزشي افزايش يابد. در نهايت آنچه از اين پايان نامه نتيجه مي‌شود، به همراه پيشنهادات در فصل هفتم ارائه خواهد شد.

# مروری بر کاربرد بهینه سازی

## ۲

### چند هدفی در کنترل

*"For since the fabric of the universe is most perfect and the work of a most wise Creator, nothing at all takes place in the universe in which some rule of maximum or minimum does not appear."*

- Leonard Euler

#### ۱.۲ پیشگفتار

هرگونه طراحی سیستم‌های کنترلی در مسائل کاربردی مهندسی کنترل مستلزم در نظر گرفتن همزمان چندین تابع هدف می‌باشد. طراحی یک کنترلر همواره شامل یکسری مشخصه‌هایی نظیر درجه پایداری، زمان نشست، زمان صعود، فراجهدش و انرژی مصرفی می‌باشد که اغلب نیز در تضاد با یکدیگر می‌باشند. این موضوع بیانگر این مطلب است که در طراحی بهینه یک سیستم کنترلی، امکان دستیابی به پاسخی که از دید چندین تابع هدف بطور همزمان بهینه باشند امکانپذیر نیست. بنابراین نه تنها یک پاسخ یکتا وجود ندارد، بلکه مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه غیر برتر نسبت به یکدیگر می‌توان یافت که در علم بهینه سازی به آن جبهه پارتو<sup>۷</sup> می‌گویند [۲، ۲۳]. این فصل به بررسی کاربرد بهینه سازی چند هدفی<sup>۸</sup> در طراحی کنترلر اختصاص داده شده است. بنابراین در ابتدا برخی از تعاریف مهم در مسائل بهینه سازی چند هدفی (MOP) ارائه و سپس به نقش MOP در طراحی کنترلر پرداخته می‌شود. همچنین چگونگی طراحی کنترلر برای یک سیستم دینامیکی خطی با استفاده از MOP ارائه می‌شود. در نهایت به چگونگی نمایش دادن یک جبهه پارتو  $n$  بعدی با استفاده از ابزارهای گرافیکی می‌پردازیم.

#### ۲.۲ بهینه سازی چند هدفی

مسائل طراحی در مهندسی، علوم پایه، اقتصاد و حتی در زندگی روزمره ما همواره یکسری پرسش‌هایی را در ذهن ایجاد می‌کنند که آمیخته با مباحث بهینه سازی می‌باشد و با در نظر گرفتن آنهاست که می‌توان فرآیند تصمیم‌گیری را بهتر انجام داد. درواقع، پاسخ به یک پرسش، مستلزم انتخاب بهترین تصمیم از بین تعدادی روش‌های مختلف یا مجموعه‌ای از تصمیم‌ها می‌باشد. درست زمانی که باید بطور همزمان چند هدف را در نظر گرفت کار اغلب سخت می‌شود و اینجاست که باید از MOP

<sup>7</sup> Pareto front

<sup>8</sup> Multi-objective Optimization