

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دوره دکتری مهندسی مکانیک  
گرایش طراحی کاربردی-دینامیک و کنترل

عنوان رساله:

# **مدل سازی حرکت وضعی-مداری و کنترل آشوب حرکت وضعی ماهواره ژيروسات**

استاد راهنما:

**دکتر سید حسین ساداتی**

نگارش:

**سید مهدی ابطحی**

پائیز ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

مادرم،

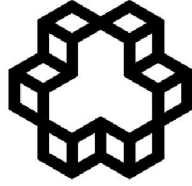
دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش بمرنج بود و وجودش برایم همه مهر

و روح پاک پدرم،

که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم،

و به تمام آزادمدانی که نیک می اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند.

## تأییدیه هیات داوران



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:  
**"مدل سازی حرکت وضعی-مداری و کنترل آشوب حرکت وضعی ماهواره ژيروساتات"** توسط  
**"سید مهدی ابطحی"** صحت و کفایت انجام شده را برای اخذ درجه دکتری تخصصی در رشته  
مهندسی مکانیک گرایش دینامیک و کنترل مورد تأیید قرار می دهد.

- ۱- استاد راهنما: آقای دکتر سید حسین ساداتی
- ۲- استاد مشاور: آقای دکتر حسن سالاریه
- ۳- ممتحن خارجی: آقای دکتر حسین پورتاکدوست
- ۴- ممتحن خارجی: آقای دکتر حسین بلندی
- ۵- ممتحن داخلی: آقای دکتر علی غفاری
- ۶- ممتحن داخلی: آقای دکتر علی نحوی
- ۷- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: آقای دکتر شهرام آزادی

## اظهارنامه دانشجو

**عنوان پایان نامه:** مدل سازی حرکت وضعی-مداری و کنترل آشوب حرکت وضعی ماهواره

ژیروستات

**استاد راهنما:** دکتر سید حسین ساداتی

**دانشجو:** سید مهدی ابطحی

**شماره دانشجویی:** ۸۷۰۰۵۲۶

اینجانب سید مهدی ابطحی دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش دینامیک و کنترل در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌دهم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده است و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگران به مرجع اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جای دیگری ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چهارچوب مصوب دانشگاه بطور کامل رعایت شده است.

سید مهدی ابطحی

۱۳۹۲/۶/۱۵

## حق چاپ و تکثیر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد و هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر مجاز می باشد.  
ضمناً متن این صفحه باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.  
همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیر و تشکر از

استاد فرزانه دکتر سید حسین ساداتی

و دانشمند فرهیخته دکتر حسن سالاریه

و تمامی اساتید گرانقدری که افتخار شاگردی‌شان را داشتیم و همچنین خانواده و دوستان عزیزم

که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با

راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند.

## چکیده

دینامیک آشوبناک ماهواره ژيروسات سه محوره در حرکت وضعی-مداری تحت تاثیر گشتاورهای اغنشاشی گرادبان جاذبه زمین مورد بررسی قرار گرفت. در مدل‌سازی دینامیکی، از روش همیلتون در کنار معادلات سینماتیکی استفاده شد. بدلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل ماهواره ژيروسات، مرتبه معادله همیلتونین سیستم با استفاده از تبدیل کانونی دپریت توسعه‌یافته توسط متغیرهای جدید وضعی-مداری سرت-آندویر کاهش داده شد. سپس با روش‌های تحلیلی همچون انتگرال ملنیکف و هندسه منیفلد ریچی در کنار روش‌های عددی مانند نمای لیاپانف، مسیرهای صفحه فازی، مقاطع پوانکاره و پاسخ‌های سری زمانی به تحلیل و اثبات آشوب در سیستم پرداخته شد. مقادیر منفی اسکالر ریچی در کنار مقادیر مثبت بزرگترین نمای لیاپانف و نتایج حاصل از انتگرال ملنیکف مبین وجود دوشاخگی هیتروکلینیک و آشوب در پاسخ‌های سیستم است. بنابراین با انتخاب پارامترهای سیستم طبق تابع ملنیکف، می‌توان از وقوع آشوب در سیستم جلوگیری نمود. مطابق معادله همیلتونین، با توجه به تاثیر اغتشاش‌گونه حرکت انتقالی در دینامیک وضعی، در بحث کنترل وضعی ماهواره، تنها به کنترل آشوب دینامیک دورانی ماهواره ژيروسات پرداخته می‌شود. برای این منظور، از کنترلر آشوب OGY بر پایه خطی‌سازی نگاشت پوانکاره استفاده شده که منجر به تولید سیگنال ضعیف کنترلی و کاهش مصرف انرژی می‌شود. برای تخمین نگاشت پوانکاره از ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) بهره برده شد. سپس کنترلر بهینه و گسسته مربعی خطی (LQR) روی نگاشت پوانکاره خطی شده طراحی شد. نتایج حاصل از کنترلر DLQR-OGY حاکی از ایجاد رفتاری پایدار و مقاوم در کنار حذف آشوب در پاسخ‌های سیستم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ماهواره ژيروسات، حرکت وضعی-مداری، تبدیل دپریت، دینامیک آشوبناک، انتگرال ملنیکف،

هندسه ریچی، کنترل آشوب، نگاشت پوانکاره، ماشین بردار پشتیبان.



۲.....	<b>فصل اول – مقدمه‌ای بر سیستم آشوبناک ماهواره</b>
۲.....	۱-۱- تعاریف مقدماتی.....
۴.....	۱-۱-۱- تعاریف ریاضی آشوب.....
۶.....	۲-۱-۱- ویژگی‌های سیستم‌های آشوبناک.....
۸.....	۳-۱-۱- نمونه‌هایی از سیستم آشوبناک.....
۱۰.....	۲-۱- روش‌های تحلیل آشوب.....
۱۰.....	۱-۲-۱- روش‌های تحلیل ریاضی دقیق آشوب.....
۱۳.....	۲-۲-۱- روش‌های تحلیل عددی آشوب.....
۱۴.....	۳-۱- سیستم دینامیکی آشوبناک ماهواره.....
۱۵.....	۱-۳-۱- عوامل موثر بر آشوبناکی ماهواره.....
۱۸.....	۲-۳-۱- مروری بر پیشینه تحقیق در دینامیک آشوبناک ماهواره.....
۲۲.....	۴-۱- کنترل آشوب در حرکت ماهواره.....
۲۳.....	۱-۴-۱- کلیات و اهداف کنترل آشوب.....
۲۵.....	۲-۴-۱- کنترل آشوب نوع اول.....
۲۹.....	۳-۴-۱- کنترل آشوب نوع دوم.....
۳۰.....	۴-۴-۱- الگوریتم کنترل آشوب به روش OGY.....
۳۴.....	۵-۴-۱- پیشرفت‌های تئوری کنترلی OGY.....
۳۸.....	۵-۱- انگیزه پژوهش، نوآوری‌ها و چالش‌ها.....
۴۴.....	<b>فصل دوم – مدل‌سازی دینامیکی حرکت انتقالی – دورانی ماهواره ژيروسات</b>
۴۴.....	۱-۲- ساختار مدل دینامیکی ماهواره ژيروسات.....
۴۵.....	۱-۱-۲- مقدمه‌ای بر ساختار ماهواره‌های ژيروسات.....

- ۲-۱-۲ - شرح ساختار مدل حرکت انتقالی-دورانی سیستم ماهواره ژيروسات ..... ۴۶
- ۲-۲ - مدل سازی ریاضی حرکت وضعی-مداری سیستم ..... ۴۹
- ۱-۲-۲ - مدل سینماتیکی سیستم ..... ۴۹
- ۲-۲-۲ - مدل سینتیکی سیستم ..... ۴۹
- ۳-۲ - کاهش مرتبه همیلتونین سیستم ..... ۵۴
- ۱-۳-۲ - تبدیل کانونی توسعه یافته دپریت ..... ۵۵
- ۲-۳-۲ - معادلات دینامیکی کاهش یافته سیستم ..... ۵۶
- ۴-۲ - صحه گذاری مدل سازی ریاضی سیستم ..... ۵۹
- ۱-۴-۲ - مدل سازی دینامیکی سیستم با روش نیوتن-اولر ..... ۵۹
- ۲-۴-۲ - صحه گذاری نسبی مدل با مقایسه با پژوهشی دیگر ..... ۶۲
- ۳-۴-۲ - صحه گذاری کلی مدل با کمک نرم افزار STK ..... ۶۴
- فصل سوم- تحلیل ریاضی آشوبناک حرکت انتقالی-دورانی ماهواره ژيروسات ..... ۶۷**
- ۱-۳ - انتگرال ملنیکف ..... ۶۷
- ۲-۳ - تحلیل حرکت آشوبناک ماهواره ژيروسات به روش ملنیکف ..... ۶۹
- ۱-۲-۳ - حل مدارات هیتروکلینیک سیستم ..... ۶۹
- ۲-۲-۳ - بکارگیری انتگرال ملنیکف ..... ۷۴
- ۳-۳ - هندسه منیفلد ریچی ..... ۸۰
- ۴-۳ - تحلیل حرکت آشوبناک ماهواره ژيروسات به روش ریچی ..... ۸۴
- فصل چهارم- تحلیل عددی آشوبناک حرکت انتقالی-دورانی ماهواره ژيروسات ..... ۹۱**
- ۱-۴ - نمای لیاپانف ..... ۹۱
- ۲-۴ - شبیه سازی عددی سیستم ..... ۹۵
- فصل پنجم- کنترل آشوب حرکت وضعی ماهواره ژيروسات ..... ۱۰۶**
- ۱-۵ - مدل سازی دینامیکی حرکت وضعی ماهواره ژيروسات ..... ۱۰۶

۱۰۷.....	مدل سینماتیکی ماهواره ژيروسات.....	۵-۱-۱
۱۰۹.....	مدل سینتیکی ماهواره ژيروسات.....	۵-۱-۲
۱۱۱.....	تحلیل غیرخطی سیستم مدار باز ماهواره ژيروسات در حرکت وضعی.....	۵-۲
۱۱۲.....	رفتار شبه-پریودیک سیستم مدار باز.....	۵-۲-۱
۱۱۴.....	رفتار آشوبناک سیستم مدار باز.....	۵-۲-۲
۱۱۸.....	کنترل آشوب دینامیک وضعی ماهواره ژيروسات به روش DLQR-OGY.....	۵-۳
۱۱۹.....	فرمولاسیون ریاضی کنترل آشوب OGY.....	۵-۳-۱
۱۲۲.....	ماشین‌های بردار پشتیبان.....	۵-۳-۲
۱۳۰.....	تخمین نگاشت پوانکاره سیستم آشوبناک ماهواره ژيروسات توسط LS-SVM.....	۵-۳-۳
۱۳۲.....	طراحی الگوریتم کنترلی DLQR-OGY.....	۵-۳-۴
۱۳۴.....	پاسخ‌های سیستم مدار بسته و تحلیل پایداری.....	۵-۳-۵
۱۴۰.....	<b>فصل ششم – جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات</b> .....	
۱۴۰.....	۱-۶- نتیجه‌گیری.....	
۱۴۷.....	۲-۶- پیشنهادات.....	
۱۴۹.....	<b>پیوست‌ها</b> .....	
۱۴۹.....	ضمیمه الف: محاسبه انرژی جنبشی حرکت وضعی-مداری ماهواره ژيروسات.....	
۱۵۲.....	ضمیمه ب: محاسبه ممنتوم زاویه‌ای کل ماهواره ژيروسات.....	
۱۵۸.....	<b>مراجع و ماخذ</b> .....	

## فهرست جدولها و نمودارها و اشکال

۸۰	جدول ۳-۱: بررسی وضعیت آشوب براساس مقادیر ماهواره های واقعی
۸۸	جدول ۳-۲: مقادیر ثابت بکارگرفته شده در شبیه‌سازی سیستم ماهواره ژيروسات
۸۷	جدول ۳-۳: مقادیر شرایط اولیه بکارگرفته شده در شبیه‌سازی سیستم ماهواره ژيروسات
۹۳	جدول ۴-۱: مقادیر نمای لیاپانف سیستم ماهواره ژيروسات در حرکت وضعی-مداری
۱۱۲	جدول ۵-۱: مقادیر ثابت بکارگرفته شده در شبیه‌سازی سیستم مدار باز ماهواره ژيروسات
۱۱۲	جدول ۵-۲: مقادیر شرایط اولیه بکارگرفته شده در شبیه‌سازی سیستم مدار باز ماهواره ژيروسات
۱۱۸	جدول ۵-۳: مقادیر نمای لیاپانف برای دینامیک دورانی آشوبناک ماهواره ژيروسات
۱۴۷	جدول ۶-۱: مقایسه نتایج پاسخ‌های سیستم کنترلی مدار بسته با کارهای مشابه

---

۱۳	شکل ۱-۱: واگرایی مسیرهای سیستم با تغییر جزئی در شرایط اولیه
۳۱	شکل ۱-۲: سطح مقطع پوانکاره
۳۴	شکل ۱-۳: تجسم تصویری نگاشت پوانکاره
۴۸	شکل ۲-۱: ساختار دینامیکی حرکت انتقالی-دورانی ماهواره ژيروسات
۵۶	شکل ۲-۲: متغیرهای سرت-آندویر در تبدیل توسعه یافته دپریت [105]
۶۱	شکل ۲-۳: مسیرهای صفحه فازی $\omega_x - \omega_y$ در سیستم مدار باز
۶۲	شکل ۲-۴: پاسخ‌های سری زمانی سرعت‌های زاویه‌ای $\omega_x$ و $\omega_y$ در سیستم مدار باز
۶۳	شکل ۲-۵: مسیرهای صفحه فازی $\omega_x - \omega_y - \omega_z$ در سیستم مدار باز
۶۳	شکل ۲-۶: مسیرهای صفحه فازی $\omega_x - \omega_y$ در سیستم مدار باز
۶۳	شکل ۲-۷: مسیرهای صفحه فازی $\omega_x - \omega_z$ در سیستم مدار باز
۶۴	شکل ۲-۸: مسیرهای صفحه فازی $\omega_y - \omega_z$ در سیستم مدار باز
۶۵	شکل ۲-۹: مدل ماهواره ژيروسات در نرم افزار تحلیلی STK
۷۲	شکل ۳-۱: مسیرهای فازی کره ممنوم سیستم به همراه مدارات هیتروکلینیک و نقاط زینی
۷۸	شکل ۳-۲: سطح جداکننده نواحی آشوبی و غیرآشوبی بر حسب پارامترهای $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{m}_s$
۷۸	شکل ۳-۳: سطح جدا کننده نواحی آشوبی و غیر آشوبی بر حسب پارامترهای $\bar{I}_1, \bar{I}_2, R_0$

- شکل ۳-۴: سطح جدا کننده نواحی آشوبی و غیر آشوبی بر حسب پارامترهای  $\bar{I}_1, \bar{m}_s, R_O$  ۷۹
- شکل ۳-۵: سطح جدا کننده نواحی آشوبی و غیر آشوبی بر حسب پارامترهای  $\bar{I}_2, \bar{m}_s, R_O$  ۷۹
- شکل ۳-۶: نمودار آشوبناک اسکالر ریچی بر حسب  $l$  ۸۹
- شکل ۴-۱: مقدار بزرگترین نمای لیاپانف نسبت به پارامتر اغتشاشی  $\varepsilon$  ۹۴
- شکل ۴-۲: مقطع پوانکاره در سیستم منظم غیر اغتشاشی بازا  $\varepsilon = 0$  ۹۷
- شکل ۴-۳: مقطع پوانکاره در سیستم آشوبناک اغتشاشی بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  ۹۷
- شکل ۴-۴: مقطع پوانکاره شامل باند آشوب نزدیک نقاط زینی بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  ۹۸
- شکل ۴-۵: مسیر صفحه فازی پریودیک  $l$ - $j$  سیستم بازا  $\varepsilon = 0$  ۹۸
- شکل ۴-۶: مسیر صفحه فازی شبه-پریودیک  $l$ - $j$  سیستم بازا  $\varepsilon = 0.8 \times 10^{-8}$  ۹۹
- شکل ۴-۷: مسیر صفحه فازی آشوبناک  $l$ - $j$  سیستم بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  ۹۹
- شکل ۴-۸: مسیر فازی دو بعدی شبه-پریودیک  $\omega_x - \omega_y$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۰
- شکل ۴-۹: مسیر فازی سه بعدی  $i$ - $j$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۰
- شکل ۴-۱۰: مسیر فازی دو بعدی  $i$ - $j$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۱
- شکل ۴-۱۱: مسیر فازی دو بعدی  $i$ - $j$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۱
- شکل ۴-۱۲: مسیر فازی دو بعدی  $i$ - $j$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۱
- شکل ۴-۱۳: مقطع پوانکاره  $i$ - $j$  حاصل تقاطع مسیرهای فازی  $i$ - $j$  با صفحه  $l = \pi / 2$  ۱۰۲
- شکل ۴-۱۴: مقطع پوانکاره  $i$ - $j$  حاصل تقاطع مسیرهای فازی  $i$ - $j$  با صفحه  $j = 2.7$  ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵: مقطع پوانکاره  $i$ - $j$  حاصل تقاطع مسیرهای فازی  $i$ - $j$  با صفحه  $i = 0.8$  ۱۰۲
- شکل ۴-۱۶: پاسخ سری زمانی آشوبناک  $l$  بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷: پاسخ سری زمانی آشوبناک  $P_l$  بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۳
- شکل ۴-۱۸: پاسخ سری زمانی آشوبناک  $\gamma$  بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۳
- شکل ۴-۱۹: پاسخ سری زمانی آشوبناک  $P_\gamma$  بازا  $\varepsilon = 2 \times 10^{-8}$  در دینامیک وضعی-مداری ماهواره ژيروسات ۱۰۳
- شکل ۵-۱: مسیرهای صفحه فازی شبه-پریودیک سیستم بازا  $I_W = 0$  ۱۱۲
- شکل ۵-۲: مسیرهای صفحه فازی شبه-پریودیک سیستم بازا  $I_W = 0$  ۱۱۲
- شکل ۵-۳: مسیرهای صفحه فازی شبه-پریودیک سیستم بازا  $I_W = 0$  ۱۱۳
- شکل ۵-۴: مسیرهای صفحه فازی شبه-پریودیک سیستم بازا  $I_W = 0$  ۱۱۳

- شکل ۵-۵: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_4$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۳
- شکل ۵-۶: مسیره‌های صفحه فازی  $q_2 - q_4$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۳
- شکل ۵-۷: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_3 - q_4$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۳
- شکل ۵-۸: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_2$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۳
- شکل ۵-۹: پاسخ سری زمانی  $q_1$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۴
- شکل ۵-۱۰: پاسخ سری زمانی  $\omega_x$  شبه-پریودیک سیستم بازاء  $I_W = 0$  ۱۱۴
- شکل ۵-۱۱: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_2 - q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۲: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_3 - q_4$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۳: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۴: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_2$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۵: مسیره‌های صفحه فازی  $q_1 - q_4$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۶: مسیره‌های صفحه فازی  $q_2 - q_4$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۵
- شکل ۵-۱۷: مسیره‌های صفحه فازی  $q_2 - q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۶
- شکل ۵-۱۸: مسیره‌های صفحه فازی  $q_3 - q_4$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۶
- شکل ۵-۱۹: مقطع پوانکاره  $q_1 - q_2$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۶
- شکل ۵-۲۰: مقطع پوانکاره  $q_2 - q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱: مقطع پوانکاره  $q_1 - q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۶
- شکل ۵-۲۲: پاسخ سری زمانی  $q_1$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۷
- شکل ۵-۲۳: پاسخ سری زمانی  $q_2$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۷
- شکل ۵-۲۴: پاسخ سری زمانی  $q_3$  آشوبناک سیستم بازاء  $I_W = 0.3$  ۱۱۷
- شکل ۵-۲۵: ابرصفحه جداکننده بهینه برای حالت دو کلاس کاملاً جدا ۱۲۴
- شکل ۵-۲۶: ابرصفحه جداکننده بهینه برای حالت دو کلاس دارای همپوشانی ۱۲۵
- شکل ۵-۲۷: ساختار ماشین بردار پشتیبان ۱۲۷
- شکل ۵-۲۸: ساختار شبکه LS-SVM برای تخمین نگاشت پوانکاره با خروجی  $q_1$  ۱۳۰
- شکل ۵-۲۹: ساختار شبکه LS-SVM برای تخمین نگاشت پوانکاره با خروجی  $q_2$  ۱۳۰
- شکل ۵-۳۰: مقایسه داده‌های واقعی با مقادیر حاصل از شبکه LS-SVM در ۱۳۰

- ۱۳۲ تخمین نگاشت پوانکاره با خروجی  $q_1$
- شکل ۵-۳۱: مقایسه داده‌های واقعی با مقادیر حاصل از شبکه LS-SVM در
- ۱۳۲ تخمین نگاشت پوانکاره با خروجی  $q_2$
- ۱۳۳ شکل ۵-۳۲: ساختار کنترل آشوب سیستم ماهواره ژيروساتات براساس الگوریتم DLQR-OGY
- شکل ۵-۳۳: پاسخ‌های سری زمانی پارامترهای دورانی کواترنیون  $q_1, q_2, q_3$
- ۱۳۵ در سیستم کنترلی DLQR-OGY
- شکل ۵-۳۴: پاسخ‌های سری زمانی سرعت‌های زاویه‌ای بدنه ماهواره  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$
- ۱۳۶ در سیستم کنترلی DLQR-OGY
- ۱۳۶ شکل ۵-۳۵: پاسخ‌های سری زمانی زوایای دورانی اولر  $\varphi, \theta, \psi$  در سیستم کنترلی DLQR-OGY
- شکل ۵-۳۶: پاسخ‌های سرعت‌های زاویه‌ای چرخ‌های عکس‌العملی  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z \times 10^3$
- ۱۳۷ در کنترلر DLQR-OGY
- شکل ۵-۳۷: پاسخ‌های گشتاورهای پایدارساز کنترلی  $N_{Cx}, N_{Cy}, N_{Cz}$  در
- ۱۳۷ سیستم کنترلی DLQR-OGY

## فهرست علائم و اختصارات

$m_s$	جرم کل ماهواره ژيروسات
$m_B$	جرم بدنه اصلی ماهواره
$m_W$	جرم هریک از چرخ‌های پایدارساز
$R_O$	فاصله بین مرکز جرم کل ماهواره با مرکز جرم زمین
$\omega_O$	سرعت دورانی حرکت مداری ماهواره
$V_O$	سرعت خطی حرکت انتقالی ماهواره در مدار
$\mu_O$	زاویه آنومالی خارج از مرکز
$\varphi, \theta, \psi$	زوایای اولر
$\Phi, \Theta, \Psi$	زوایای اولر در متغیرهای جدید
$h, g, l$	متغیرهای حرکت دورانی جدید سرت-آندویر
$\lambda_O, r_O$	متغیرهای حرکت مداری جدید سرت-آندویر
$I_x, I_y, I_z$	ممان اینرسی بدنه اصلی ماهواره
$I_1, I_2, I_3$	ممان اینرسی اصلی کل ماهواره
$I_W$	ممان اینرسی چرخ پایدارساز
$\bar{I}_1, \bar{I}_2$	ممان اینرسی بی بعد
$r$	فاصله بین مرکز جرم چرخ پایدارساز و مرکز جرم بدنه اصلی ماهواره
$G$	ثابت جهانی گرانش
$M$	جرم کره زمین
$T$	انرژی جنبشی ماهواره
$U_g$	انرژی پتانسیل گرانشی ماهواره
$L$	لاگرانژین سیستم ماهواره ژيروسات
$E$	انرژی کل سیستم ماهواره ژيروسات
$\tilde{T}$	انرژی جنبشی بی بعد



$\tau$	پارامتر زمان بی بعد
$\sum \vec{F}$	برایند نیروهای گرانشی اعمالی بر ماهواره ژيروساتات
$H$	همیلتونین سیستم ماهواره ژيروساتات
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	مولفه‌های سرعت زاویه‌ای بدنه اصلی ماهواره
$\omega_{xx}, \omega_{yy}, \omega_{zz}$	مولفه‌های سرعت زاویه‌ای کل ماهواره در حرکت وضعی-مداری
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	مولفه‌های سرعت زاویه‌ای کل ماهواره ژيروساتات در راستای محورهای اصلی
$\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$	سرعت‌های زاویه‌ای چرخ پایدارساز ماهواره ژيروساتات
$q$	مختصات تعمیم یافته
$P_q$	ممنتوم زاویه‌ای تعمیم یافته
$\vec{N}_{gg}$	گشتاور گرادیان جاذبه زمین
$\vec{N}_C$	گشتاور کنترلی پایدارساز ماهواره
${}_G H_T$	ممنتوم زاویه‌ای کل ماهواره حول مرکز جرم کل ماهواره ژيروساتات
$H_x, H_y, H_z$	ممنتوم‌های زاویه‌ای
$h_x, h_y, h_z$	ممنتوم‌های زاویه‌ای بی بعد
$\vec{H}_T$	ممنتوم‌های زاویه‌ای کل حرکت وضعی ماهواره
$H_O$	ممنتوم‌های زاویه‌ای کل ماهواره زیروساتات در حرکت وضعی-مداری
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	پارامترهای اغتشاشی مربوط به حرکت مداری
$\varepsilon_g$	پارامترهای اغتشاشی مربوط به گشتاور گرادیان جاذبه زمین
$\varepsilon$	پارامترهای اغتشاشی واحد
$s$	پارامتر مسیر
$\chi$	ماتریس متریک مثبت معین
$\Gamma_{jk}^i$	نماد کریستفل
$Ric$	اسکالر ریچی
$\lambda_i$	نمای لیاپانف
$\vec{q}$	پارامترهای کوآترنیون

$S(\vec{\omega})$ 

ماتریس وضعیت دورانی

 $K(x, x')$ 

تابع هسته

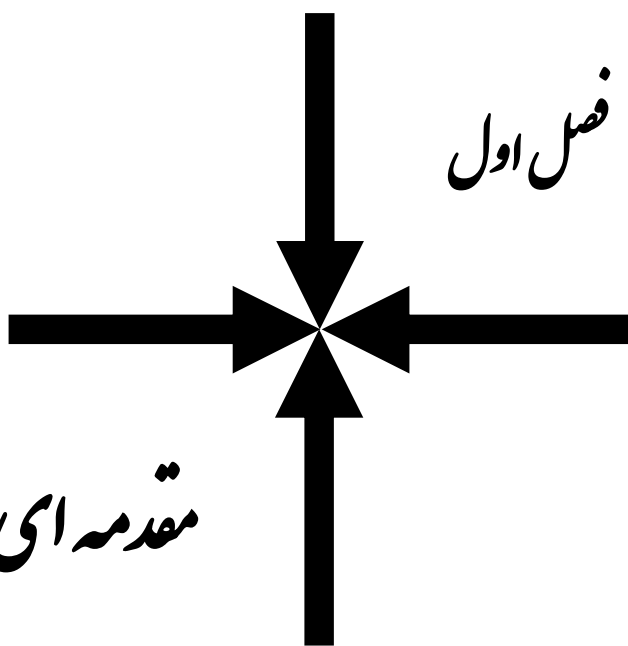
 $\tilde{x}$ 

خطای سیستم دینامیکی

 $u(k)$ 

ورودی کنترلی سیستم مدار بسته

فصل اول



مقدمه ای بر سیستم آشوبناک ماهواره

## فصل اول - مقدمه‌ای بر سیستم آشوبناک ماهواره

در بخش مقدمه، ابتدا آشنایی کلی نسبت به سیستم‌های غیرخطی آشوبناک حاصل شده که شامل بیان تعاریف ریاضی و ویژگی‌های سیستم‌های آشوبناک است. همچنین نمونه‌هایی از دینامیک‌های مشهور آشوبناک به همراه روش‌های مختلف تحلیل ریاضی و عددی آشوب ارائه شده است. سپس روی سیستم آشوبناک ماهواره و عوامل موثر بر آشوبناک شدن آن تمرکز شده است. برای این منظور پیشینه نسبتاً کاملی از مدل‌سازی دینامیک آشوبناک ماهواره و اختصاصاً ماهواره‌های ژيروسات به همراه تحلیل‌های ریاضی و عددی صورت گرفته بیان شده است. سپس به بیان کلیاتی در مورد کنترل آشوب، اهداف، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف آن به همراه پیشرفت و تکاملی که در منطق کنترلی‌شان رخ داده، پرداخته شده است. در پایان با مروری بر پژوهش‌ها و تحقیقات انجام شده تا کنون در مورد کنترل دینامیک آشوبناک ماهواره، خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در این پایان‌نامه ارائه شده است.

### ۱-۱- تعاریف مقدماتی

یکی از ابزارهای مهم در زمینه تحلیل پدیده‌های فیزیکی و مهندسی که منجر به مدل‌سازی چنین پدیده‌هایی می‌شوند، معادلات دیفرانسیل (معادلات تفاضلی) هستند. در صورتیکه بتوان مدل ریاضی را بصورت خطی تقریب زد، در اینصورت ابزار ریاضی کاملی جهت تحلیل دقیق سیستم وجود دارد. در صورت استفاده نکردن از چنین تقریبی و به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، با معادلات دیفرانسیل غیرخطی مواجه خواهیم شد که ابزار تحلیلی دقیق و جامعی در این زمینه در دسترس نیست.