

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش دینامیک پرواز و کنترل

عنوان:

# طراحی و ساخت کنترلر برای یک چرخ عکس‌العملی با استفاده از روش مد لغزشی

اساتید راهنما:

**دکتر جعفر روشنی‌یان**

**دکتر امیرعلی نیک‌خواه**

دانشجو:

**محمد حسین بهشتی**

تیر ۱۳۸۹



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

### تأییدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان

« طراحی و ساخت کنترلر برای یک چرخ عکس‌العملی با استفاده از روش مد لغزشی » توسط آقای

محمد حسین بهشتی، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته:

مهندسی هوافضا گرایش: دینامیک پرواز و کنترل مورد تأیید قرار می‌دهند.

امضاء امضاء - اساتید راهنما دکت‌ر جعفر روشنی‌یان

امضاء امضاء دکت‌ر امیرعلی نیکخواه

امضاء امضاء - اساتید ممتحن دکت‌ر علیرضا نوین‌زاده

امضاء امضاء دکت‌ر بهروز ابراهیمی

امضاء امضاء - نماینده تحصیلات تکمیلی دکت‌ر سهیل مظفری

# اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه:

**طراحی و ساخت کنترلر برای یک چرخ عکس‌العملی با استفاده از روش مد لغزشی**

اساتید راهنما: دکتر جعفر روشنی‌یان، دکتر امیرعلی نیکخواه

نام دانشجو: محمد حسین بهشتی

شماره دانشجویی: ۸۶۰۱۵۸۴

اینجانب **محمد حسین بهشتی**، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش دینامیک پرواز و کنترل از دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

## حق چاپ و تکثیر و مالکیت نتایج

- ۱ - حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.
  - ۲ - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد 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 نمی‌باشد.

به پاس زحمات بی دریغی که در تمامی مراحل زندگی  
برای من متحمل شده اند، این اثر ناچیز را به پدر و مادر  
عزیزم تقدیم می دارم.

## تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات مشفقانه و راهنمایی‌های خردمندانه اساتید ارجمندم دکتر جعفر روشنی‌یان و دکتر امیرعلی نیک‌خواه که در مراحل مختلف انجام این پروژه یار و همراه من بودند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورم. برای تمامی این بزرگواران و همه کسانی که در راه پیشرفت این مرز و بوم پر گهر گام برمی‌دارند، آرزوی شادکامی و موفقیت روز افزون را از درگاه الهی می‌طلبم.

## چکیده

این پایان نامه از دو بخش شبیه سازی و ساخت تشکیل شده است که در پایان به صورت یک سامانه سخت افزار در حلقه ارائه می گردد. در بخش شبیه سازی مدل دینامیکی حرکت وضعی یک شبیه ساز ماهواره با در نظر گرفتن مدل الکتریکی- دینامیکی چرخ عکس العملی استخراج گشته و سپس از این معادلات برای شبیه سازی مجازی در محیط سیمولینک استفاده می شود. در بخش طراحی کنترلر ابتدا یک کنترلر تناسبی- مشتقی بر اساس روش جایدهی قطب برای مدل خطی شده شبیه ساز ماهواره طراحی و بر روی مدل غیرخطی پیاده سازی می شود. جهت کنترل سرعت چرخ عکس العملی از دو روش کنترل تناسبی-انتگرالی- مشتقی و کنترل مد لغزشی استفاده می گردد. مزیت اصلی کنترل کننده مد لغزشی نسبت به کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی، پایداری و مقاوم بودن آن نسبت به شرایط مختلف کاری است.

در بخش ساخت ابتدا یک عملگر چرخ عکس العملی به همراه کنترل کننده سرعت آن ساخته می شود و سپس با استفاده از رابط سریال (RS 232) خروجی سرعت چرخ با مدل دینامیکی شبیه ساز ماهواره در محیط سیمولینک (MATLAB SIMULINK) مرتبط می گردد. بدین صورت عملگر واقعی چرخ عکس العملی با مدل مجازی ماهواره در یک حلقه کنترلی قرار گرفته و یک سامانه سخت افزار در حلقه ساده و کم هزینه برای ماهواره طراحی می شود. با استفاده از این سامانه می توان الگوریتم های کنترلی مختلفی را بر روی شبیه ساز ماهواره و چرخ عکس العملی پیاده سازی نمود و همچنین روش های متنوع مدل سازی ماهواره را مورد ارزشیابی قرار داد.

**واژه های کلیدی:** شبیه ساز ماهواره-چرخ عکس العملی -کنترل مد لغزشی- سخت افزار در حلقه



## فهرست مطالب

۲	(۱) مقدمه .....
۳	(۱-۱) تعریف مسئله .....
۴	(۲-۱) چیدمان تحقیق .....
۶	(۲) سامانه شبیه ساز ماهواره .....
۷	(۱-۲) تست بدهای صفحه ای .....
۸	(۲-۲) تست بدهای چرخشی .....
۹	(۱-۲-۲) مدل های میزی یا چتری .....
۱۲	(۲-۲-۲) مدل دمبلی .....
۱۵	(۳-۲) سیستم های ترکیبی .....
۱۶	(۴-۲) مدل سازی دینامیکی شبیه ساز ماهواره .....
۱۹	(۵-۲) طراحی کنترلر PD برای مدل خطی شده شبیه ساز ماهواره .....
۲۲	(۶-۲) پیاده سازی کنترلر PD بر روی مدل غیرخطی شبیه ساز ماهواره .....
۲۵	(۳) عملگر چرخ عکس العملی .....
۲۶	(۱-۳) تئوری چرخ عکس العملی .....
۲۷	(۲-۳) مانور وضعیت .....
۳۰	(۳-۳) مدل چرخ عکس العملی .....
۳۴	(۴-۳) طراحی کنترلر PID برای چرخ عکس العملی .....

- ۳-۵) طراحی کنترلر مد لغزشی برای چرخ عکس‌العملی ..... ۳۹
- ۳-۵-۱) تئوری کنترل مد لغزشی ..... ۴۰
- ۳-۵-۲) طراحی کنترلر مد لغزشی برای سیستم‌های خطی ..... ۴۴
- ۳-۵-۳) طراحی کنترلر مد لغزشی برای چرخ عکس‌العملی ..... ۴۶
- ۳-۵-۴) مقایسه کنترل کننده مد لغزشی با کنترل کننده PID ..... ۵۱
- ۴) مبانی کنترل دیجیتال ..... ۵۶
- ۴-۱) انواع سیگنال‌ها ..... ۵۷
- ۴-۲) سیستم‌های کنترل زمان گسسته ..... ۵۹
- ۴-۳) کوانتیزه و رمز کردن ..... ۶۳
- ۴-۴) معادل نگهدار مرتبه صفر ..... ۶۴
- ۴-۵) پایداری و پاسخ گذرا ..... ۶۷
- ۴-۶) طراحی کنترلر دیجیتال خطی برای چرخ عکس‌العملی ..... ۶۹
- ۴-۶-۱) کنترلر گسسته PID ..... ۷۲
- ۴-۶-۲) کنترلر گسسته PI ..... ۷۵
- ۵) آزمایش سخت افزار در حلقه ..... ۸۰
- ۵-۱) شبیه سازی سخت افزار در حلقه ..... ۸۱
- ۵-۲) انتخاب گام زمانی شبیه سازی ..... ۸۶
- ۵-۳) روند اجرای حلقه شبیه سازی ..... ۸۹
- ۵-۴) شناسایی عملگر ..... ۹۰
- ۵-۴-۱) روش‌های شناسایی سیستم‌های خطی ..... ۹۳

۹۳.....	۲-۴-۵) روش حداقل مربعات بازگشتی .....
۹۵.....	۳-۴-۵) شناسایی توسط روش RLS .....
۱۰۳ .....	۵-۵) طراحی و ساخت مدار راه انداز عملگر.....
۱۰۷ .....	۶) نتایج .....
۱۰۸ .....	۱-۶) شبیه سازی مجازی .....
۱۱۱ .....	۲-۶) شبیه سازی سخت افزار در حلقه .....
۱۱۴.....	۳-۶) بحث و نتیجه گیری .....
۱۱۵ .....	۴-۶) پیشنهادهایی برای مطالعات آینده .....
۱۱۶.....	مراجع .....

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲) بازوی دو محوره در لابراتوار روباتهای هوافضایی دانشگاه استنفورد ..... ۸
- شکل ۲-۲) (a) مدل میزی (b) مدل چتری (آزادی حرکتی کامل در یاو) ..... ۹
- شکل ۳-۲) یاتاقان هوایی مرکز فرماندهی پرواز فضایی ناسا ..... ۱۱
- شکل ۴-۲) شبیه ساز دو درجه آزادی دانشگاه جورجیا ..... ۱۲
- شکل ۵-۲) مدل دمبلی (آزادی کامل در یاو و رول) ..... ۱۳
- شکل ۶-۲) تست بد سه محوره دانشگاه میشیگان ..... ۱۴
- شکل ۷-۲) تست بد سه محوره دانشگاه ویرجینیا ..... ۱۴
- شکل ۸-۲) طرح کلی پاندول سه بعدی صلب ..... ۱۶
- شکل ۹-۲) پیاده سازی کنترلر PD بر روی مدل غیرخطی شبیه ساز ماهواره در محیط سیمولینک ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲) مانور وضعیت شبیه ساز ماهواره به ازای ورودی پله در کانالهای گردش، چرخش و سمت ..... ۲۳
- شکل ۱-۳) نمونه ای از یک چرخ عکس العملی ..... ۲۶
- شکل ۲-۳) استراتژی انجام یک مانور وضعیت توسط یک چرخ عکس العملی ..... ۲۹
- شکل ۳-۳) مدل شماتیک یک چرخ عکس العملی (موتور DC و عضو چرخان) ..... ۳۰
- شکل ۴-۳) مدل شبیه سازی شده یک چرخ عکس العملی در محیط سیمولینک ..... ۳۲
- شکل ۵-۳) پاسخ حلقه باز چرخ عکس العملی به ازای ورودی پله واحد ..... ۳۳
- شکل ۶-۳) مکان هندسی ریشه ها برای مدل چرخ عکس العملی ..... ۳۳
- شکل ۷-۳) شبیه سازی کنترلر حلقه بسته چرخ عکس العملی در محیط سیمولینک ..... ۳۶
- شکل ۸-۳) پاسخ حلقه بسته چرخ عکس العملی به ازای ورودی پله واحد ..... ۳۷

- شکل ۳-۹) پاسخ کنترلر PID تنظیم شده به ازای ورودی پله واحد ( $K_i=51, K=42.5, K_d=3$ )..... ۳۸
- شکل ۳-۱۰) تلاش کنترلی PID تنظیم شده به ازای ورودی پله واحد..... ۳۸
- شکل ۳-۱۱) نمایش صفحه فاز سیستم برای دو حالت  $k_1 > 1$  و  $k_1 < 1$ ..... ۴۲
- شکل ۳-۱۲) نمایش صفحه فاز سیستم تحت کنترل ساختار متغیر..... ۴۲
- شکل ۳-۱۳) شبیه سازی کنترلر مد لغزشی در محیط سیمولینک برای مدل چرخ عکس العملی..... ۴۹
- شکل ۳-۱۴) تلاش کنترلی، تابع لغزش  $s(x,t)$  و صفحه فاز برای کنترلر مد لغزشی..... ۵۰
- شکل ۳-۱۵) پاسخ کنترلر SMC به ازای ورودی پله واحد ( $\lambda = 10, K = 100$ )..... ۵۱
- شکل ۳-۱۶) نتایج شبیه سازی کنترلر PID در محیط اغتشاشی..... ۵۲
- شکل ۳-۱۷) نتایج شبیه سازی کنترلر SMC در محیط اغتشاشی..... ۵۳
- شکل ۳-۱۸) پاسخ کنترلر SMC به ازای ورودی پله واحد در محیط اغتشاشی..... ۵۴
- شکل ۴-۱) سیگنال آنالوگ زمان پیوسته..... ۵۷
- شکل ۴-۲) سیگنال کوانتیزه شده زمان پیوسته..... ۵۸
- شکل ۴-۳) سیگنال نمونه برداری داده ها..... ۵۸
- شکل ۴-۴) سیگنال دیجیتال..... ۵۹
- شکل ۴-۵) سیستم کنترل پیوسته..... ۶۰
- شکل ۴-۶) سیستم کنترل دیجیتال..... ۶۰
- شکل ۴-۷) انواع سیگنالها در شماتیک کنترلر دیجیتال..... ۶۱
- شکل ۴-۸) دیاگرام بلوکی سیستم کنترل دیجیتال..... ۶۱
- شکل ۴-۹) کوانتیزه کردن و رمزگذاری..... ۶۳

- شکل ۴-۱۰) سیستم کنترل دیجیتال مرتب شده ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۱) تابع گسسته  $H_{zoh}(z)$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲) سیگنال نگهدار مرتبه صفر  $\hat{u}(t)$  و سیگنال نمونه  $u(k)$  ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۳) انواع سیگنال ها در سیستم کنترل دیجیتال گسسته و بلوک نگهدار مرتبه صفر ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۴) سیستم کنترل دیجیتال گسسته ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵) فرکانس طبیعی و ضریب میرایی در صفحه  $Z$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۶) تابع تبدیل معادل روش نگهدار مرتبه صفر ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۷) پاسخ حلقه باز مدل گسسته چرخ عکس العملی به ازای ورودی پله واحد ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸) پاسخ حلقه بسته مدل گسسته چرخ عکس العملی به ازای ورودی پله واحد ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۹) مکان هندسی ریشه ها برای مدل گسسته چرخ عکس العملی ..... ۷۴
- شکل ۴-۲۰) پاسخ حلقه بسته کنترلر PI به ازای ورودی پله واحد ..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱) مکان هندسی ریشه ها برای مدل گسسته چرخ عکس العملی با جبران ساز PI ..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲) پاسخ حلقه بسته کنترلر PI با اعمال ضریب  $K$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳) پاسخ حلقه بسته کنترلر PI با اعمال ضرایب  $(K_p = 10, K_i = 20)$  ..... ۷۸
- شکل ۵-۱) شمای کلی سیستم سخت افزار در حلقه ..... ۸۵
- شکل ۵-۲) سیگنال کنترلی دلخواه و سیگنال پالس مرتبط با آن در انکدر افزایشی ..... ۸۷
- شکل ۵-۳) تاخیر متناوب ایجاد شده با سیگنال کنترلی ..... ۸۸
- شکل ۵-۴) حلقه داخلی عملگر ..... ۸۹
- شکل ۵-۵) پاسخ عملگر به تغییر پله در فرمان ورودی ..... ۹۲

- شکل ۵-۶) شمای کلی یک سیستم کنترلی ..... ۹۲
- شکل ۵-۷) پاسخ عملگر در برابر ورودی سینوسی ..... ۹۶
- شکل ۵-۸) پاسخ عملگر در برابر ورودی دندان اره ای ..... ۹۶
- شکل ۵-۹) پاسخ عملگر در برابر موج مربعی ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۰) بلوک سیمولینک جهت شناسایی سیستم ..... ۹۸
- شکل ۵-۱۱) پارامترهای a و b و c ..... ۹۹
- شکل ۵-۱۲) مقایسه خروجی عملگر و خروجی مدل شناسایی شده به ازای ورودی موج مربعی با دامنه  $\pm 12V$  و فرکانس  $f=0.2$  ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۳) مقایسه خروجی عملگر و خروجی مدل شناسایی شده به ازای ورودی سینوسی با دامنه  $\pm 12V$  و فرکانس  $f=0.1$  ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۴) مقایسه خروجی عملگر و خروجی مدل شناسایی شده به ازای ورودی دندان اره ای با دامنه  $\pm 12V$  و فرکانس  $f=0.1$  ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۵) مقایسه خروجی عملگر و خروجی مدل شناسایی شده به همراه ترم اصطکاک کولمب ، به ازای ورودی سینوسی با دامنه  $\pm 12V$  و فرکانس  $f=0.1$  ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۶) مقایسه خروجی عملگر و خروجی مدل شناسایی شده به همراه ترم اصطکاک کولمب ، به ازای ورودی دندان اره ای با دامنه  $\pm 12V$  و فرکانس  $f=0.1$  ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۷) ارتباط اجزای مدار راه انداز یک چرخ عکس العملی ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۸) نمونه آزمایشگاهی یک چرخ عکس العملی به همراه مدار راه انداز الکترونیکی ..... ۱۰۵
- شکل ۶-۱) شبیه سازی مجازی شبیه ساز ماهواره به همراه سه چرخ عکس العملی در محیط سیمولینک ..... ۱۰۸
- شکل ۶-۲) ورودی کنترلی چرخ عکس العملی به صورت عدد PWM به ازای ورودی پله در کانال گردش ..... ۱۰۹

- شکل ۳-۶) خطای سرعت عملگر چرخ عکس‌العملی به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۰۹
- شکل ۴-۶) سرعت زاویه‌ای شبیه‌ساز ماهواره به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۰
- شکل ۵-۶) مانور وضعیت شبیه‌ساز ماهواره به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۰
- شکل ۶-۶) نحوه قرارگیری عملگر واقعی چرخ عکس‌العملی در کانال گردش..... ۱۱۱
- شکل ۷-۶) ورودی کنترلی چرخ عکس‌العملی به صورت عدد PWM به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۲
- شکل ۸-۶) خطای سرعت عملگر چرخ عکس‌العملی به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۲
- شکل ۹-۶) سرعت زاویه‌ای شبیه‌ساز ماهواره به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۳
- شکل ۱۰-۶) مانور وضعیت شبیه‌ساز ماهواره به ازای ورودی پله در کانال گردش..... ۱۱۳



## فصل اول

## (۱) مقدمه

همزمان با گسترش تحقیقات فضایی تمایل برای استفاده از ماهواره‌های کوچک نیز افزایش یافته است. فاکتور اصلی در این کلاس از ماهواره‌ها هزینه پایین، وزن کم و پایین بودن خطای جهت‌گیری می‌باشد. برای کاهش وزن و هزینه یک ماهواره می‌توان به جای ژيروسکوپ‌های دقیق مکانیکی و سامانه‌های پیچیده ناوبری از حسگرهای الکترونیکی ممز<sup>۱</sup> و یا حسگرهای خورشیدی دقیق<sup>۲</sup> استفاده نمود. با استفاده از یک سری فیلترهای مشخص می‌توان از این حسگرهای الکترونیکی با نرخ نمونه-برداری کم (حداکثر ۱۰ هرتز) دقت مناسبی را در تعیین وضعیت بدست آورد. [۱۰]

همچنین یکی از بهترین عملگرهای فعال برای پایدارسازی وضعیت ماهواره<sup>۳</sup> و انجام مانورهای وضعیت چرخ‌های عکس‌العملی می‌باشند که از جمله وسایل تبادل ممنتم زاویه‌ای<sup>۴</sup> هستند. چرخ‌های عکس-العملی با توجه به اینکه نیاز به جرم کاری نداشته و فقط انرژی الکتریکی مصرف می‌کنند، در اکثر ماهواره‌های متوسط و کوچک استفاده می‌شوند. نسبت گشتاور کنترلی بدست آمده از آنها به وزن و ابعادشان نیز بسیار مناسب و مقرون به صرفه است. [۱۵]

یکی از الگوریتم‌های کنترلی مقاوم در برابر اغتشاشات روش مد لغزشی است که چنین عملکردی در ازای تلاش کنترلی بسیار زیاد بدست می‌آید. برای پیاده‌سازی این روش بر روی شبیه‌ساز ماهواره می‌بایست از حسگرهای دقیق و با نرخ نمونه‌برداری بالا استفاده نماییم که از نظر میزان هزینه و وزن برای ماهواره‌های کوچک مناسب نمی‌باشند. با توجه به اینکه کلیه اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سامانه

---

<sup>1</sup> MEMS

<sup>2</sup> CCDs Sun Sensor

<sup>3</sup> Attitude Stabilization

<sup>4</sup> Momentum Exchange Devices

شبیه ساز ماهواره به عملگر چرخ عکس‌العملی وارد می‌شود می‌توان به کمک یک سرعت سنج مناسب این الگوریتم مد لغزشی را برای کنترل سرعت یک چرخ عکس‌العملی به کار برد و خطای جهت گیری شبیه ساز ماهواره را در شرایط اغتشاشی و نامعینی کاهش داد. [۱۶-۱۷]

## ۱-۱) تعریف مسئله

به طور کلی تست های پروازی، پرهزینه، زمان بر و بسیار پیچیده هستند. این مسئله در مورد ماهواره‌ها جلوه‌ای چندین برابر به خود می‌گیرد و انجام آزمایش‌های مکرر پروازی ماهواره‌ها از نقطه نظر اقتصادی تقریباً غیر محتمل تلقی می‌گردد.

جهت طراحی و بررسی قسمت های مختلف یک ماهواره، انجام آزمایش های آنرودینامیکی، سازه ای، موتوری و مباحث مرتبط با هدایت و کنترل به میان خواهد آمد. هریک از این آزمایش ها به طور جداگانه و توسط تیم های مختلف، انجام می پذیرد. در این میان آزمایش های مربوط به هدایت و کنترل که هم مباحث تئوری و هم مباحث عملی را شامل می شوند، نیاز به داشتن اطلاعات جامعی از همه بخش های دیگر را به صورت شبیه سازی دارند تا عملکرد این زیر سیستم مورد بررسی قرار گیرد. اما یک برنامه شبیه سازی، هر اندازه کامل باشد، نمی تواند بسیاری از مسائلی را که در عمل به وجود خواهد آمد در بر گیرد.

برای رسیدن به یک شبیه سازی که به واقعیت نزدیکتر است، می‌توان به جای مدل یک یا چند قسمت از وسیله، از خود آنها به شکلی که با شبیه سازی در ارتباط باشند، بهره گرفت. به عنوان مثال می‌توان از یک عملگر چرخ عکس‌العملی که فرمان کنترلی را به عنوان ورودی دریافت می‌دارد برای نیل به این منظور استفاده کرد و خروجی آن را دوباره به شبیه سازی باز گرداند. به چنین شکلی از شبیه سازی در

اصطلاح، شبیه سازی سخت افزار در حلقه اطلاق می گردد. با داشتن یک چنین شبیه سازی، می توان عملکرد کنترلر های مختلف را مورد بررسی قرار داد. [۴۳]

## (۲-۱) چیدمان تحقیق

مطالب آورده شده در این پایان نامه به طور کلی به دو دسته تئوری و تجربی تقسیم می شوند. در فصل دوم شبیه سازی سه درجه آزادی یک ماهواره مورد بررسی قرار می گیرد. این فصل در واقع پیش نیازی برای فصل های بعد محسوب می شود. در فصل سوم نحوه استخراج کنترلرهای PID و مد لغزشی برای یک عملگر چرخ عکس العملی به تفصیل شرح داده خواهند شد. به منظور آشنایی با مبانی کنترل دیجیتال انواع سیگنال ها، سیستم های کنترل دیجیتال و نمونه برداری زمان گسسته<sup>۵</sup> به صورت کلی در فصل چهارم توضیح داده شده است. شبیه سازی سخت افزار در حلقه، لزوم استفاده از این شبیه سازی و نحوه پیاده سازی آن در فصل پنجم آورده خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی کنترلرهای مختلف برای کانال گردش شبیه ساز ماهواره و همچنین نتایج شبیه سازی سخت افزار در حلقه در فصل ششم ارائه می گردد.

---

<sup>5</sup> Discrete Time