





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

کنترل تطبیقی بازوی ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل ولتاژ

دانشجو:

علی اصغر رضایی

استاد راهنما

دکتر محمدمهدی فاتح

شهریور ۱۳۹۷

شماره ۱۵۸۷، ۱۰۰  
تاریخ ۹۷، ۶، ۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای علی اصغر رضایی با شماره دانشجویی ۹۴۰۸۲۲۴ رشته مهندسی برق - کنترل گرایش کنترل تحت عنوان: کنترل تطبیقی بازوی ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل ولتاژ که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب)  / مردود   
 نوع تحقیق: نظری  / عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد مهدی نافع	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حمزه اظرفین	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مجتبی احمدی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر زکریا زاره	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: عوض الله زار  
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: \_\_\_\_\_

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

خدایا ...

به من زیستنی عطا کن که در لحظه مرگ، بر بی ثمری لحظه‌ای که برای زیستن گذشته است، حسرت نخورم، و مردنی عطا کن که بر بیهودگی‌اش، سوگوار نباشم. بگذار تا آن را من خود انتخاب کنم اما آنچنان که تو دوست میداری.

خدایا: "چگونه زیستن" را تو به من بیاموز، "چگونه مردن" را خود خواهم آموخت.

"دکتر علی شریعتی"

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما ره‌آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگی‌تان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

در اینجا بر خود فرض می‌دانم از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح که در انجام پایان‌نامه از نظرات و راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان بهره‌مند شده‌ام، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از اساتید گرامی دانشگاه صنعتی شاهرود که در محضرشان شاگردی کردم قدردانی می‌کنم.

تشکر ویژه از دوستان عزیزم به خاطر همراهی صمیمانه شان دارم.

از خداوند تعالی سعادت و سرفرازی همه این عزیزان را خواهانم.

## تعهد نامه

اینجانب **علی اصغر رضایی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "کنترل تطبیقی بازوی ربات با مفاصل انعطاف پذیر با راهبرد کنترل ولتاژ" تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

در این پایان‌نامه، یک کنترل‌کننده تطبیقی به منظور دستیابی به ردگیری و تنظیم موقعیت بازوی ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، طراحی می‌شود. قانون کنترل بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ و مستقل از مدل دینامیکی ربات بوده و هر مفصل به صورت جداگانه کنترل می‌شود. این طرح کنترلی در برابر عدم قطعیت‌های مدل ربات مقاوم است. طرح کنترل تطبیقی ارائه شده اولین بار بر روی بازوهای رباتیک انعطاف‌پذیر با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، پیاده‌سازی می‌شود. پایداری سیستم کنترل، تحلیل و تضمین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی کارایی موثر طرح کنترلی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، کنترل تطبیقی، راهبرد کنترل ولتاژ، عدم قطعیت مدل

## فهرست

۱	فصل اول مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ مروری بر تحقیقات پیشین
۱۰	۳-۱ اهداف و اهمیت تحقیق
۱۳	فصل دوم مدل سازی
۱۴	۱-۲ تعریف و مدل سازی سیستم بازوی انعطاف پذیر
۱۵	۲-۲ سینماتیک
۱۶	۱-۲-۲ معادلات سینماتیکی ربات
۱۸	۳-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات
۱۹	۱-۳-۲ سرعت زاویه‌ای
۲۰	۲-۳-۲ سرعت خطی
۲۳	۴-۲ معادلات دینامیکی ربات
۲۳	۱-۴-۲ انرژی پتانسیل
۲۴	۲-۴-۲ انرژی جنبشی
۲۷	۵-۲ معادلات حالت ربات با حضور محرکه‌ها
۳۱	فصل سوم راهبرد کنترل ولتاژ
۳۲	۱-۳ راهبرد کنترل ولتاژ
۳۵	فصل چهارم کنترل تطبیقی
۳۶	۱-۴ کنترل کننده تطبیقی



۳۶	۲-۴ کنترل کننده تطبیقی مستقیم:
۴۰	۳-۴ تحلیل پایداری:
۴۱	۴-۴ شبیه سازی
۴۲	۱-۴-۴ کنترل ردگیری
۵۲	۲-۴-۴ تنظیم
۵۷	۵-۴ نتیجه گیری
۵۹	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها
۶۰	۱-۵ نتیجه گیری
۶۱	۲-۵ پیشنهادات
۶۳	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ مدل مفصل انعطاف‌پذیر [۶۰]..... ۲۷
- شکل ۱-۳ دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات بصورت مفصل مستقل ..... ۳۳
- شکل ۱-۴ ربات دو محوره با محرک موتور دیسی [۵۹]..... ۴۱
- شکل ۲-۴ مسیر مطلوب هر مفصل ..... ۴۳
- شکل ۳-۴ ردیابی مفصل اول همراه با مسیر مطلوب..... ۴۳
- شکل ۴-۴ خطای ردگیری مفصل اول ..... ۴۴
- شکل ۵-۴ ولتاژ موتور اول ..... ۴۴
- شکل ۶-۴ ردیابی مفصل دوم همراه با مسیر مطلوب ..... ۴۵
- شکل ۷-۴ خطای ردگیری مفصل دوم ..... ۴۵
- شکل ۸-۴ ولتاژ موتور دوم ..... ۴۶
- شکل ۹-۴ پارامترهای تطبیق  $R$  ..... ۴۶
- شکل ۱۰-۴ پارامترهای تطبیق  $d$  ..... ۴۷
- شکل ۱۱-۴ ردیابی مفصل اول همراه با مسیر مطلوب با حضور اغتشاش خارجی ..... ۴۸
- شکل ۱۲-۴ خطای ردگیری مفصل اول با حضور اغتشاش خارجی ..... ۴۸
- شکل ۱۳-۴ ولتاژ موتور اول با حضور اغتشاش خارجی ..... ۴۹
- شکل ۱۴-۴ ردیابی مفصل دوم همراه با مسیر مطلوب با حضور اغتشاش خارجی ..... ۴۹
- شکل ۱۵-۴ خطای ردگیری مفصل دوم با حضور اغتشاش خارجی ..... ۵۰
- شکل ۱۶-۴ ولتاژ موتور دوم با حضور اغتشاش خارجی ..... ۵۰
- شکل ۱۷-۴ پارامترهای تطبیق  $R$  با حضور اغتشاش خارجی ..... ۵۱
- شکل ۱۸-۴ پارامترهای تطبیق  $d$  با حضور اغتشاش خارجی ..... ۵۱

۵۲	شکل ۱۹-۴ تنظیم مفصل اول
۵۳	شکل ۲۰-۴ خطای تنظیم مفصل اول
۵۳	شکل ۲۱-۴ ولتاژ موتور اول
۵۴	شکل ۲۲-۴ تنظیم مفصل دوم
۵۴	شکل ۲۳-۴ خطای تنظیم مفصل دوم
۵۵	شکل ۲۴-۴ ولتاژ موتور دوم
۵۵	شکل ۲۵-۴ پارامترهای تطبیق $R$
۵۶	شکل ۲۶-۴ پارامترهای تطبیق $d$

## فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱ پارامترهای موتور ..... ۴۲

جدول ۴-۲ پارامترهای دینامیک ربات ..... ۴۲

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

در دنیای امروزی، به دلیل بازدهی بالاتر ربات‌ها، قابلیت اطمینان و دقت بیشتر آن‌ها و به منظور استفاده در طیف وسیعی از کاربردها که انجام آن‌ها خطراتی را برای انسان‌ها به ارمغان می‌آورد، پیشرفت‌های زیادی در زمینه رشد و توسعه صنعت رباتیک شده است. امروزه کمتر صنعتی را می‌توان یافت که وابسته به علم رباتیک نباشد و ربات‌های مختلف در خط تولید محصولات آن کارخانه به کار برده نشوند. علاوه بر کاربردهای صنعتی، ربات‌ها در بسیاری از کاربردهای نظامی نیز استفاده می‌شوند به گونه‌ای که با قابلیت کنترل از راه دور یا کنترل مستقل خود، خطرات و تهدیدات جانی متوجه انسان‌ها را به حداقل می‌رسانند. در این بین بازوهای رباتیک از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند.

در دهه‌های پیش راهبرد اصلی در طراحی و ساخت ربات‌ها، صلبیت بالای آن‌ها بود و این رویکرد نه به علت ضعف ربات‌های انعطاف‌پذیر، بلکه به منظور سادگی کنترل ربات‌های صلب<sup>۲</sup> اتخاذ می‌گردید [۱]. ربات‌های صلب برای داشتن سختی بالا، اغلب سنگین و حجیم ساخته می‌شوند و دارای نسبت وزن به تحمل بار بالا و مصرف انرژی زیادی هستند. انعطاف‌پذیری در مفاصل به دلیل خاصیت الاستیک در سیستم انتقال قدرت است. بنابراین می‌توان گفت مفاصل هر بازویی، انعطاف‌پذیر است و فرض صلب بودن مفاصل یک فرض ساده شونده است. بنابراین امروزه پذیرفته شده که روش‌های کنترل بازوهای صلب جوابگوی تمامی نیازهای کنترل در رباتیک نبوده و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو مطالعه کنترل ربات‌های انعطاف‌پذیر سرعت رو به رشدی داشته و روش‌های کنترلی و کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است.

---

manipulator<sup>۱</sup>  
Rigid<sup>۲</sup>

## ۲-۱ مروری بر تحقیقات پیشین

در یک تقسیم کلی، ربات‌ها به دو دسته انعطاف‌پذیر و صلب تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر کنترل ربات‌های صلب به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته و اکثر کنترل‌کننده‌های صنعتی بر این مبنا طراحی شده‌اند. انعطاف‌پذیری مفاصل و رابط‌ها دو عامل اصلی انعطاف در بازوهای مکانیکی هستند. در این پایان‌نامه فرض شده است که رابط‌ها صلب بوده و فقط مفاصل انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار گرفته شده است.

ربات یک سیستم مکانیکی قابل کنترل است که از حسگرها، برای هدایت یک یا چند مجری نهایی از طریق حرکت برنامه‌ریزی شده در فضای کار، به منظور دست کاری اشیاء فیزیکی استفاده می‌کند [۹]. بازوهای رباتیک برای بهتر به انجام رساندن کارهایی چون احساس کردن، تحویل و جابجایی اشیاء یا کارهای تکراری مانند جوشکاری، مونتاژ، بسته بندی، سوراخ کاری، رنگ آمیزی، لحیم کاری، جوشکاری و کار در شرایط خاص شامل محیط‌های رادیواکتیو و شیمیایی و غیره استفاده می‌شوند [۵]. امروزه بازوهای رباتیک در صنایع به طور وسیع تعریف شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند، و استفاده از آن‌ها مستلزم تحقق مسیر حرکت دلخواه با کنترل همزمان سیستم می‌باشد [۶].

نوع کنترل ربات با توجه به اهداف مورد نیاز، که قرار است ربات انجام دهد، تعیین می‌گردد. در اکثر کارهای صنعتی از کنترل موقعیت ربات استفاده می‌شود. ربات مسیر مورد نظر را طی کرده و عملکرد مورد نیاز را انجام می‌دهد. بعنوان مثال، در جابجایی اجسام، ابتدا گیره باز می‌شود و به سمت جسم حرکت می‌کند و پس از گرفتن جسم، در چند مرحله جابجایی، جسم را به محل مورد نظر می‌رساند. سپس، برای گرفتن قطعه بعدی به جای اول خود بر می‌گردد. در بعضی موارد استفاده از ربات‌ها مستلزم تحقق مسیر حرکت دلخواه با کنترل همزمان نیروی سیستم می‌باشد. بنابراین، کنترل نیروی ربات یا کنترل همزمان موقعیت و نیروی ربات مطرح می‌شوند [۷]. مانند گرفتن اجسام یا سنباده کاری که

علاوه بر کنترل موقعیت ربات، کنترل نیروی ربات نیز مورد توجه است. در این زمینه فعال تحقیقاتی، روش‌های کنترل دیگری از قبیل کنترل رفتار دینامیکی ربات و غیره نیز مورد توجه قرار گرفته است. جهت استفاده از این ربات‌ها باید بتوان بخوبی آن‌ها را کنترل نمود. بنابراین مطالعه و کنترل آن از اهمیت بسیاری برخوردار است.

نیروی محرکه بسیاری از ربات‌ها توسط موتورهای الکتریکی تامین می‌شود. موتورهای DC با سرعت بالا می‌چرخند اما بیشتر آن‌ها قدرتمند نیستند (گشتاور آنها کم است). به منظور افزایش گشتاور و کاهش سرعت، موتورهای الکتریکی مجهز به سیستم انتقال قدرت مانند هارمونیک درایو، تسمه [۲] و یا محورهای بلند [۳] می‌شوند. یک محرکه هارمونیک نوع خاصی از مکانیزم چرخ دنده است. به دلیل وجود چرخ دنده‌ها، پدیده انعطاف در اثر عدم صلبیت دستگاه انتقال قدرت (چرخ دنده) به وجود می‌آید. همه مواد سختی محدود دارند و با اعمال گشتاور و نیرو، تغییر شکل کشسان (انعطاف‌پذیر) می‌دهند. حتی در ربات‌هایی که صلب فرض می‌شوند وقتی در سرعت‌های بالا استفاده شوند نوسان ظاهر می‌شود و اثر انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه است. انعطاف‌پذیری، منبع اصلی نوسانات در ربات‌های صنعتی است [۴]. اولین راه برای کاهش انعطاف مفاصل، تغییر در طراحی مکانیکی آن‌ها است. به عنوان مثال چرخ دنده‌ها را می‌توان با سختی بالاتر مواد، مانند سرامیک، ساخت. اما استفاده از این روش محدود است و از طرف دیگر بازوهای مکانیکی از پیش ساخته شده را پوشش نمی‌دهد. راه دیگر در نظر گرفتن انعطاف در مدل‌سازی معادلات دینامیکی حاکم است که این خود از عوامل تاثیر گذار در پیچیدگی معادلات دینامیکی سیستم ربات محسوب می‌شود. منشا ایجاد انعطاف در اغلب ربات‌هایی با مفاصل انعطاف‌پذیر، وجود سیستم انتقال حرکت هارمونیک درایو است و دیگر موارد ذکر شده به صورت محدود نمایان می‌شوند. استفاده از روش‌های کنترل ربات صلب برای ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر، می‌تواند باعث ناپایداری، عدم ردیابی و افت عملکرد در سیستم کنترل گردد. پس باید اثر انعطاف را برای بهبود کارایی کنترل‌کننده در نظر گرفت.



روش‌های کنترلی و کارهای تحقیقاتی بسیاری جهت کنترل ربات در کتاب‌ها، مقالات، مجلات علمی و کنفرانس‌ها ارائه شده است. تعدادی از روش‌های پیشنهادی در صنعت بصورت عملی اجرا شده است. اغلب روش‌های کنترل ربات بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور مفاصل ربات می‌باشد [۷]. یکی از معایب این روش، محاسبات زیاد و پیچیدگی آن است. زیرا از مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود. برای حل مسئله مذکور، اخیراً کنترل ربات بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ موتورهای ربات، ارائه شده است [۸]. در این روش، به نقش محرکه‌ها در سیستم کنترل ربات توجه شده و از مدل محرکه‌ها به جای مدل ربات در قانون کنترل استفاده می‌شود.

سیستم‌های رباتیک یک سیستم پیچیده، غیر خطی، دارای تزویج شدید، چندمتغیره و همراه با عدم قطعیت است [۱۰]، بنابراین کنترل آن دارای اهمیت ویژه‌ای است. از این رو، به منظور کنترل ربات برای کاهش خطای ردگیری و حذف اغتشاشات خارجی، روش‌های کنترلی مختلفی در مقالات ارائه شده است که در ادامه به اختصار به آن‌ها اشاره خواهد شد.

کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی مشتقی، یکی از کنترل‌کننده‌های کلاسیک پرکاربرد در صنعت می‌باشد و برای کنترل بازوی رباتیک هم استفاده شده است. این کنترل‌کننده علاوه بر سادگی، ردگیری مسیر مطلوب را به همراه دارد [۱۳]-[۱۱]. کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتقی به دلیل خطی بودن، در محدوده کوچک برای مدل خطی کاربرد دارد و برای سیستم‌های عملی و پیچیده مانند ربات که دارای ماهیت غیرخطی و تزویج شدید می‌باشند، به خصوص برای سرعت‌های بالا و محدوده عملکرد وسیع، با مشکلات زیادی مواجه می‌شود.

جهت کنترل این سیستم پیچیده روش‌های کنترل مجزاسازی مطرح شده است [۱۴]. این روش کنترلی یک سیستم چند ورودی چند خروجی را تبدیل به چند سیستم یک ورودی یک خروجی می‌نماید. باید توجه نمود که فرایندهای مجزاسازی گاهی ساختارهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند که در عمل قابلیت اجرا ندارند. برای حل این مسئله روش‌های کنترل جداگانه پیشنهاد می‌شود. این روش موثر برای کنترل

سیستم‌های چندمتغیره بسیار سودمند می‌باشد. در این روش، کنترل سیستم چند متغیره از طریق کنترل جداگانه چند سیستم یک ورودی - یک خروجی انجام می‌شود و اجرای عملی کنترل را آسان می‌نماید [۱۵]. این نوع کنترل کننده در بسیاری از ربات‌های مدرن بخاطر ساده شدن محاسبات و پایین آمدن هزینه سخت افزار بکار گرفته شده است.

یکی از روش‌های مجزاسازی، روش خطی‌سازی پس‌خورده است [۱۶] ، [۱۷]. به طور کلی ایده اصلی خطی‌سازی پس‌خورده عبارت است از ساختن یک قانون کنترل که بخش‌های غیرخطی معادلات دینامیکی را حذف کند و مجزاسازی را بطور کامل و آسان انجام دهد. قانون کنترل خطی‌سازی پس‌خورده می‌تواند، سیستم غیرخطی و با تزویج بالا را به سیستم خطی و بدون تزویج تبدیل نماید. به دلیل عدم وجود عبارات غیرخطی در سیستم به دست آمده، مطالعه و کنترل آن بسیار ساده‌تر است. در این روش، سیستم باید قابلیت خطی‌سازی پس‌خورده را داشته باشد. هر سیستم که به فرم همراه در بیاید قابلیت خطی‌سازی پس‌خورده را دارد [۱۴]. مدل بازوی ربات هم می‌تواند به فرم همراه در بیاید. این روش یکی از روش‌های بر مبنای مدل است. بنابراین اگر مدل دقیق سیستم در دسترس نباشد باید بتوان بر عدم قطعیت‌های مدل غلبه کرد. روش دیگر برای حل مشکل وجود دینامیک‌های غیر خطی، روش گشتاور محاسباتی است که یک کاربرد خاص از روش خطی‌سازی پس‌خورده می‌باشد. در این روش عبارات غیرخطی مدل ربات، با استفاده مستقیم از معادله دینامیکی آن جبران می‌شود. این روش کنترلی نیز به مانند روش خطی‌سازی پس‌خورده، نیازمند در اختیار داشتن مدل دینامیکی ربات می‌باشد [۱۸] ، [۱۹]. روش کنترلی دیگر به نام مفصل مستقل یا کنترل جداگانه است که در آن هر مفصل یا به عبارتی محرکه‌های هر مفصل به صورت جداگانه کنترل می‌شود. پس‌خوردها از همان مفصل گرفته می‌شود که کنترل می‌شود [۲۰]. این روش کنترلی در بسیاری از ربات‌ها به خاطر ساده شدن کنترل ربات و پایین آمدن هزینه سخت افزار به کار گرفته می‌شود [۲۱]. در این روش تمامی اثرات تزویج به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود و توسط کنترل کننده‌ها جبران می‌شود [۷]. عملکرد این سیستم‌ها با روش‌های

مقاوم و تطبیقی بهبود می‌یابد. همچنین روش کنترل فازی بدلیل غلبه بر عدم قطعیت‌ها بطور موثری می‌تواند در کنترل جداگانه بکار گرفته شود.

در زمینه کنترل مقاوم کارهای بسیاری در فضای مفصلی انجام شده است [۲۲]، [۲۳]. در مرجع [۲۴] کنترل مقاوم ربات با استفاده از مدل نامی برای ساده‌سازی طرح و بهبود عملکرد کنترلی سیستم، راهکاری بر مبنای حد بالای عدم قطعیت ارائه می‌شود. کنترل مقاوم ربات در فضای کار با بهره‌مندی از روش کنترل ولتاژ دارای طرحی ساده و عملکرد کنترلی مناسب برای کنترل ربات می‌باشد [۲۵]. کنترل مقاوم ربات‌های انعطاف‌پذیر نیز مبتنی بر کنترل ولتاژ ارائه شده است. در این روش کنترلی از کنترل‌کننده‌های خطی تناسبی مشتقی و تناسبی انتگرالی مشتقی بخوبی استفاده شده است [۲۶].

مدل سازی در سیستم های صنعتی معمولاً بر اساس روش‌هایی همچون استفاده از قوانین فیزیک حاکم، مدل سازی تجربی، روش‌های مختلف شناسایی و یا روش‌های دیگر صورت می‌پذیرد. در همه این روش‌ها مدل سازی کلیه دینامیک‌های سیستم مدنظر نبوده و با توجه به نیاز تنها بخش اصلی از دینامیک‌های سیستم مدل سازی می‌شود بدین ترتیب مدل سیستم تنها می‌تواند بیانی تخمینی از رفتار دینامیکی واقعی سیستم‌ها باشد.

از آنجا که سیستم های رباتیک بسیار غیر خطی هستند، کنترل بازوهای مکانیکی برای انجام کار معین، یک موضوع دشوار است. این متغیرها ممکن است ناشناخته باشند یا حتی ممکن است در طول کار تغییر کنند. هنگامی که یک سیستم رباتیک در حرکت است، متغیرهای بازو تغییر می‌کنند، و این باعث می‌شود که پارامترهای معادله دینامیکی سیستم رباتیک تغییر پیدا کند [۲۷].

کنترل‌کننده‌های پیشرفته مختلفی برای ردگیری موقعیت بازوی رباتیک با وجود عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. عدم قطعیت به دو دسته عدم قطعیت ساختاری و غیر ساختاری تقسیم می‌شود. عدم قطعیت ساختاری مربوط به پارامترهای سیستم است. زمانی که پارامترهای سیستم ثابت و یا با تغییرات بسیار جزئی ولی نامعلوم باشند، به آن عدم قطعیت ساختاری یا پارامتری گفته می‌شود. زمانی که اطلاعات

دقیقی از دینامیک سیستم در اختیار نباشد و یا به عبارت دیگر، مدل سیستم به لحاظ دینامیکی با سیستم واقعی متفاوت باشد، به آن عدم قطعیت غیرساختاری با دینامیک مدل نشده گفته می‌شود.

اگر سیستم با تداخل نامشخص مواجه شود، یا انتظار می‌رود که تغییرات پارامترهای آن را به نحوی که از ابتدا پیش بینی نشده است تحمل کند، در این وضعیت از کنترل تطبیقی استفاده می‌کنیم [۲۷].

کنترل تطبیقی از مهم‌ترین روش‌های کنترلی برای غلبه بر عدم قطعیت‌های پارامتری است. در این روش میزان نامعلومی این پارامترها توسط قوانین تطبیق تنظیم می‌شود تا از کاهش دقت و ناپایداری سیستم جلوگیری شود [۲۸]. این روش کنترلی برای سیستم‌های غیر خطی که دینامیک آن‌ها نسبت به پارامترهای مدل خطی باشند، قابل پیاده‌سازی است. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های پارامتری در سیستم‌های رباتیک، استفاده از این کنترل کننده برای کنترل ربات بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲۹]، [۳۰].

شبکه عصبی هم به دلیل قدرت شناسایی و تخمین بالا [۳۱]، توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال در [۳۲]-[۳۰] از شبکه عصبی تطبیقی برای تقریب نامعینی در سیستم ربات استفاده شده است.

کنترل پسگام یکی دیگر از روش‌های کنترلی غیر خطی است که از متغیرهای حالت سیستم پس‌خورد گرفته و به ورودی‌های کنترل اعمال می‌کند و با کمک تابع لیاپانوف، سیستم را پایدار می‌نماید. در حوزه کنترل ردگیری برای موقعیت بازوی رباتیک نیز از روش کنترل پسگام استفاده گردیده که نتایج آن رضایت بخش بوده است [۳۳]، [۳۴].

کنترل فازی به دلیل توانایی آن در غلبه بر عدم قطعیت، به صورت گسترده‌ای در کنترل جداگانه مفصل مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۳۵]، [۳۶]. قوانین فازی قادر به پیاده‌سازی تصمیم‌گیری‌های اگر آنگاه و استفاده از دانش و تجربه افراد خبره می‌باشند [۳۷]. اما تحلیل پایداری کنترل فازی بازوهای ربات یک مشکل جدی و چالش برانگیز در تئوری است. این چالش‌ها با پیچیدگی دینامیک ربات‌ها و ساختار

کنترل کننده فازی افزایش می‌یابد [۳۸]. برای رفع این مشکلات در [۳۹] کنترل کننده فازی مقاوم بر مبنای روش مستقیم لیاپانوف طراحی می‌شود. این کنترل کننده از نوع تاکاگی- سوگنو با یک ساختار ساده است. از طرفی کنترل فازی بازوهای ربات با ساختار مفصل مستقل یک مشکل جدی دارد و آن این است که مدل فضای حالت سیستم ربات، شامل دینامیک بازوها و موتورها به فرم غیر همراه، چند متغیره، به شدت غیرخطی و دارای تزویج شدید است. با توجه به این مشکل در [۴۰] از راهبرد کنترل ولتاژ و تحلیل همگرایی برای طراحی کنترل کننده فازی مقاوم دقیق استفاده شد.

مدل ربات‌هایی با مفصل انعطاف‌پذیر بسیار پیچیده‌تر از ربات‌های صلب است و تعداد درجات آزادی آن‌ها دو برابر تعداد عملگرهای کنترلی است [۴۱]. به دلیل اینکه موقعیت رابط بطور مستقیم با موقعیت موتور در ارتباط نیست، کنترل آن بسیار مشکل و پیچیده است. بنابراین، روش‌های پیشرفته‌ای برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر ارائه شده است. به طور مثال از روش‌هایی نظیر کنترل تطبیقی [۴۲]، کنترل فازی [۴۳]، شبکه عصبی [۴۴]، کنترل مقاوم [۴۵]، کنترل مود لغزشی [۴۶]، کنترل تناسبی - مشتقی - انتگرالی [۴۷] و کنترل پسگام [۴۸] برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر استفاده شده است. تمامی روش‌های مذکور بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور هستند. یکی از ایرادهای آن روش این است که در قانون کنترل از دینامیک ربات استفاده شده است. در نتیجه محاسبه قانون کنترل پیچیده و طولانی است. هنگام استفاده از این استراتژی، اغلب از دینامیک محرکه‌ها برای کنترل ربات جهت ساده‌سازی صرف نظر می‌شود [۴۹]، [۵۰]. دینامیک محرکه‌ها نقش مهمی در حرکت‌های سریع، بارهای متغیر، اصطکاک و اشباع محرکه‌ها ایفا می‌کند [۵۱]. راهبرد کنترل گشتاور شدیداً غیرخطی، با تزویج سنگین و بسیار محاسباتی است. برای برطرف کردن این مشکل از روش مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ موتورهای ربات استفاده می‌شود [۸]. در این روش، بدلیل اینکه مدل موتور بسیار ساده‌تر از مدل ربات است، طراحی کنترل کننده بر مبنای مدل موتور، بسیار ساده‌تر از طراحی آن بر مبنای مدل ربات است. در این روش به نقش محرکه‌ها در سیستم کنترل ربات توجه شده و از مدل محرکه‌ها به جای مدل ربات در قانون کنترل استفاده شده و ربات به عنوان بار خارجی در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب،

کنترل سیستم چند متغیره ربات، بسادگی تبدیل به کنترل موتورهای آن می‌شود و با کنترل جداگانه هر مفصل بسادگی می‌توان ربات موردنظر را کنترل نمود. بهره‌مندی از مجزاسازی کامل، محاسبات کم و سرعت در انجام محاسبات، سادگی طراحی و دقت بالای آن و کنترل ردگیری با سرعت بالا، از مزیت های این راهبرد محسوب می‌گردد. این راهبرد در کنترل غیر خطی ربات با مفصل انعطاف‌پذیر [۲۶] و کنترل مقاوم مفصل انعطاف‌پذیر به منظور غلبه بر نامعینی [۵۲] و کنترل فازی مقاوم جداگانه برای بازوی رباتیک [۴۰]، کنترل امپدانس ربات [۵۳]، کنترل مقاوم ربات مفصل منعطف [۵۲] کنترل فازی مقاوم بازوهای ربات [۳۹] و غیره پیشنهاد شده است.

## ۱-۳ اهداف و اهمیت تحقیق

با هر دقتی که مدل ریاضی از یک سیستم تهیه شود این مدل تنها بخشی از رفتار سیستم را می‌تواند تعبیر نمایند و از بیان دقیق کلیه دینامیک‌های سیستم ناتوان است. اهمیت این عدم دقت وقتی بیشتر روشن می‌شود که توجه نمایید کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس مدل، لازم است بر روی سیستم واقعی و نه بر روی مدل پیاده‌سازی شود. لذا این اختلاف مدل با واقعیت هرچند کوچک تاثیر خود را در کارایی سیستم و حتی گاهی در پایداری سیستم نشان می‌دهد. توصیف دقیق دینامیک ربات با مفصل انعطاف‌پذیر به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله دینامیک غیرخطی با تزویج و مرتبه بالا بسیار پیچیده است. بنابراین روش‌هایی که طراحی آن‌ها مستقل از مدل است می‌تواند جایگزین مناسبی برای کنترل ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر باشد. از جمله این روش‌ها، روش‌های کنترل تطبیقی است. کنترل‌کننده‌های تطبیقی یکی از کنترل‌کننده‌های قدرتمند در کنترل سیستم‌هایی با مدل دینامیکی نامعین هستند.

با توجه به اهمیت کاربرد ربات‌های صنعتی با مفاصل انعطاف‌پذیر و پیچیدگی معادلات آن‌ها، در این پایان‌نامه یک کنترل‌کننده تطبیقی به منظور دستیابی به ردگیری مناسب برای بازوی ربات، طراحی

خواهد شد که قانون کنترل ارائه شده مستقل از مدل دینامیکی ربات می‌باشد. بنابراین این روش کنترلی در برابر عدم قطعیت‌های مدل ربات مقاوم است.

کنترل کننده طراحی شده با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ بوده و هر مفصل به صورت جداگانه کنترل می‌شود. روش کنترل تطبیقی بیان شده برای اولین بار بر روی بازوهای رباتیک به منظور کنترل ردگیری آن با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، پیاده سازی خواهد شد.





# فصل دوم مدل سازی

## ۱-۲ تعریف و مدل سازی سیستم بازوی انعطاف پذیر

انتخاب مناسب مدل های ریاضی برای طراحی سیستم کنترل یک مرحله حیاتی در توسعه راهبردهای کنترل برای هر سیستم می باشد. به ویژه برای بازوهای رباتیک به دلیل پیچیدگی دینامیک آن ها، مدل سازی ریاضی آن دارای اهمیت زیادی است.

بازوهای انعطاف پذیر، یکی از مهم ترین و در عین حال سخت ترین و پیچیده ترین مسائل در حوزه رباتیک هستند. این بازوها به علت سبک بودن و کاهش اینرسی، دارای عملکرد سریع تر و مصرف انرژی کمتری نسبت به بازوهای صلبی هستند. در مقابل این ویژگی های مطلوب، انعطاف پذیری این بازوها باعث افزایش پیچیدگی در کنترل و ردیابی آن ها می شود که این امر حوزه تحقیقاتی جدیدی را در زمینه ی طراحی و کنترل بازوی ربات با درجه دقت قابل قبول، ایجاد کرده است. در ربات های معمولی کنترل مسیر انتهای بازوی صلبی، معادل کنترل محرک حالت صلب است اما برای کنترل مطلوب بازوی انعطاف پذیر، کنترل مطمئن تری نسبت به حالات انعطاف ناپذیر لازم است تا نوسانات و ارتعاشات اجتناب ناپذیر، در آن مد نظر قرار گیرند.

ویژگی های مدل سیستم از دیدگاه مدل سازی سیستم، طبیعت توزیع یافته دینامیک این بازوها و قابلیت انعطاف پذیری آن ها، امکان اینکه بتوان مدل دقیقی با بعد معین بدست آورد را غیر ممکن می سازد و در نتیجه مدلی غیرخطی، متغیر با زمان و با مرتبه بالا خواهیم داشت [۵۴]. بنابراین مدل های ساده ارائه شده برای آن ها غیر دقیق و همراه با نامعینی است به همین دلیل استفاده از سیستم های تطبیقی جهت کنترل آن ها مناسب به نظر می رسد.

## ۲-۲ سینماتیک

معمولا مطالعه سینماتیک<sup>۱</sup> نقطه شروع استاندارد رباتیک است. سینماتیک عبارت است از مطالعه تحلیلی هندسه حرکت ربات نسبت به یک دستگاه مختصات ثابت و نسبت به نیروها و یا گشتاوری که باعث حرکت می‌شوند. در بحث سینماتیک مستقیم ربات‌های صنعتی روشی ارائه می‌شود که موقعیت و جهت مفصل‌ها و ابزار ربات را بصورت تابعی از متغیرهای مفصل‌ها نسبت به دستگاه مختصات مرجع محاسبه می‌کند. در سینماتیک مستقیم با در دست داشتن مختصات مفصل ربات مشخص می‌شود که انتهای ربات در چه نقطه‌ای از فضا قرار می‌گیرد و چه جهتی پیدا می‌کند.

سینماتیک مستقیم ربات، در واقع توصیف کننده موقعیت مجری نهایی ربات بر اساس متغیرهای مفصل می‌باشد. بنابراین، لازم است پارامترهای موردنیاز برای توصیف کامل متغیرهای مفصل انتخاب شود. زمانی که مقادیر و زاویه‌های متناظر مفصل‌های ربات شناخته شده باشد، برای محاسبه موقعیت، جهت، سرعت و شتاب مجری نهایی از سینماتیک مستقیم استفاده می‌شود. در حالی که در نقطه مقابل آن و برای محاسبه مقادیر موردنیاز متغیرهای مفصل با توجه به مقادیر معلوم مجری نهایی، از سینماتیک معکوس ربات استفاده می‌شود [۷]. هنگام به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات، هر رابط تنها به صورت جسمی صلب، رابطه بین دو محور مفصلی را در بازوی مکانیکی ماهر توصیف می‌کند. عواملی چون استحکام رابط‌ها، جنس رابط‌ها در این بخش در نظر گرفته نمی‌شود.

دینامیک به معنی حرکت‌شناسی است و شاخه‌ای از مکانیک و علوم مهندسی است که به بحث و مطالعه دلایل حرکت و به بیانی دقیق بررسی حرکت به کمک نیروها و قوانین مربوطه می‌پردازد. مدل‌سازی دینامیک نقش مهمی در کنترل ربات دارد. یکی از روش‌های کنترل ربات، برای حرکت در مسیر مورد

نظر استفاده از معادله دینامیکی حرکت ربات برای محاسبه گشتاور محرک است. از کاربردهای معادله دینامیکی می‌توان به شبیه‌سازی حرکت ربات نیز اشاره کرد.

در این فصل بعد از به دست آوردن معادلات سینماتیکی، معادلات دینامیکی ربات محاسبه می‌شود. همچنین تأثیر دینامیک موتورها را در مدل‌سازی ربات بررسی می‌شود.

## ۲-۲-۱ معادلات سینماتیکی ربات

در ابتدا برای بدست آوردن معادلات سینماتیکی ربات، از روش دناویت هارتنبرگ استفاده کرده و دستگاه‌های مختصات ربات انتخاب و رسم شده است. در این بخش از [۷] استفاده شده است. رابطها نام‌گذاری شده و محورهای آن طبق روش دناویت هارتنبرگ تخصیص داده می‌شود. این محورها برای هر مفصل  $i$  ام، دارای سه جهت  $x, y, z$  می‌باشد. محور  $Z$  در راستای محور مفصل قرار داده می‌شود. محور  $x_0$  به صورت اختیاری انتخاب می‌شود. محور  $x_i$  به گونه‌ای انتخاب می‌شود که عمود و متقاطع با  $Z_{i-1}$  باشد و  $y_i$  به گونه‌ای انتخاب می‌شود که همه دستگاه‌ها راست‌گرد باشند. با توجه به این محورها پارامترهای رابطها ( $a_i$  طول،  $d_i$  انحراف،  $\alpha_i$  پیچش،  $\theta_i$  زاویه) به صورت زیر به دست می‌آید.

$a_i$  : فاصله از  $Z_{i-1}$  تا  $Z_i$  در جهت  $x_i$

$d_i$  : فاصله از  $x_{i-1}$  تا  $x_i$  در جهت  $x_i$

$\alpha_i$  : زاویه از  $Z_{i-1}$  تا  $Z_i$  حول  $x_i$

$\theta_i$  : زاویه از  $x_{i-1}$  تا  $x_i$  حول  $Z_{i-1}$

ماتریس همگن  $A_i$  که مختصات یک نقطه از دستگاه مختصات  $i$  را به دستگاه  $i-1$  تبدیل می‌کند تشکیل داده می‌شود. ماتریس  $A_i$  ثابت نبوده و مطابق با حرکت ربات تغییر می‌کند. از آنجایی که هر مفصل دارای یک درجه آزادی است با توجه به نوع مفصل، در صورت کشویی بودن متغیر  $q_i$  و اضافه

طول و در صورت لولایی بودن متغیر  $q_i$  و زاویه دوران مفصل را نمایش می‌دهد، بدین ترتیب  $A_i$  تابعی از فقط یک متغیر  $q_i$  می‌باشد.

$$A_i = A_i(q_i) \quad (1-2)$$

ماتریس همگنی که مختصات نقطه را از دستگاه  $Z$  به دستگاه  $A$  تبدیل می‌کند را بدست می‌آوریم. این ماتریس، ماتریس تبدیل نامیده می‌شود و عبارتست از:

$$T_i^j = A_{i+1}A_{i+2} \dots A_{j-1}A_j \quad (2-2)$$

هر نقطه روی مجری نهایی که در دستگاه  $n$  بیان می‌شود مقداری ثابت دارد و مستقل از شکل ربات است. بنابراین ماتریس تبدیل ربات محاسبه شده و موقعیت مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه، به وسیله یک بردار سه عضوی  $d$  و یک ماتریس  $3 \times 3$  دوران  $R$  قابل نمایش است.

$$T_0^n = A_1A_2 \dots A_{n-1}A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

ماتریس  $R_0^n$  جهت مجری نهایی را در دستگاه پایه نشان می‌دهد. در معادله (3-2)  $A_i$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{z,\alpha_i} \quad (4-2)$$

$\theta_i, \alpha_i, d_i, a_i$  پارامترهای رابط و مفصل هستند و ماتریس  $Rot$  ماتریس دوران و ماتریس  $Trans$  ماتریس انتقال می‌باشد. در نتیجه با توجه به (4-2) داریم:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i}C_{\alpha_i} & S_{\theta_i}S_{\alpha_i} & \alpha_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i}C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i}S_{\alpha_i} & \alpha_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

نمادهای  $S$  و  $C$  نمایانگر توابع  $\sin$  و  $\cos$  هستند که به اختصار بیان شده‌اند.

## ۳-۲ ژاکوبین بازوی ماهر ربات

معادلات سینماتیک مستقیم برای موقعیت‌های مفاصل و موقعیت و جهت مجری نهایی را بدست آوردیم. در این بخش به سینماتیک سرعت بازوی ماهر، یعنی روابط سرعت، ارتباط سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی با سرعت‌های مفاصل می‌پردازیم. برای محاسبه سرعت مجری نهایی در اثر حرکت‌های خطی و زاویه‌ای رابطه‌ها از مفهوم ژاکوبین استفاده می‌کنیم. ژاکوبین در واقع صورتی چند بعدی از مشتق است که برای تابع دلخواه  $Y$  که تابعی از متغیر  $X$  است ( $Y$  و  $X$  بردار هستند) به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Y=F(X) \quad (۶-۲)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (۷-۲)$$

که در آن  $F(x)=[f_1 \dots f_n]^T$  با مشتق‌گیری از معادله (۶-۲):

$$\dot{Y} = J(x)\dot{x} \quad (۸-۲)$$

در هر لحظه خاص  $X$  مقدار معینی دارد و  $J(x)$  یک تبدیل خطی متغیر با زمان است که متناسب با تغییر  $X$  تغییر می‌کند. در اینجا برای مرتبط ساختن سرعت مفاصل به سرعت‌های دکارتی مجری نهایی از ژاکوبین استفاده می‌شود. بصورت کلی داریم:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (۹-۲)$$

که  $\dot{x}$  بردار سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است و  $q$  همان بردار متغیرهای مفصلی است. سرعت مجری نهایی حاصل سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی رابطه‌ها است. بنابراین در ادامه ابتدا به محاسبه

روابط سرعت زاویه‌ای و سپس سرعت خطی پرداخته شده است. همچنین این روابط در محاسبه معادلات دینامیکی ربات مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرض کنیم  $W_0^n$  بیانگر بردار سرعت زاویه‌ای مجری نهایی باشد و همچنین  $V_0^n$  بیانگر بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، داریم:

$$W_0^n = J_w \dot{q} \quad (10-2)$$

$$V_0^n = J_v \dot{q} \quad (11-2)$$

که  $J_w$  و  $J_v$  ماتریس های  $3*n$  هستند. طبق معادله (9-2) داریم:

$$\begin{bmatrix} V_0^n \\ W_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{q} \quad (12-2)$$

که ماتریس ژاکوبین  $J_0^n$  عبارتست از:

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

ماتریس  $J_0^n$  یک ماتریس  $3*n$  است که در آن  $n$  تعداد رابطه‌ها می‌باشد.

## ۱-۳-۲ سرعت زاویه‌ای

سرعت زاویه‌ای مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه را می‌توان با بیان سرعت زاویه‌ای رابطه‌ها در دستگاه پایه و سپس جمع نمودن آن‌ها تعیین کرد. چنانچه مفصل  $i$  ام لولایی باشد آنگاه  $q_i$ ، متغیر مفصل  $i$  ام برابر  $\theta_i$  و  $Z_{i-1}$  محور دوران است. بنابراین سرعت زاویه‌ای رابط  $i$  در دستگاه  $i-1$  عبارتست از:

$$W_{i-1}^i = \dot{q}_i k \quad (14-2)$$

که  $k$  بردار یکه در راستای محور  $Z_{i-1}$  است. چنانچه مفصل  $i$  ام کشویی باشد در این صورت حرکت دستگاه مختصات نسبت به دستگاه مختصات  $i-1$  تنها یک انتقال است و در این صورت:

$$W_{i-1}^i = 0 \quad (15-2)$$

بنابراین اگر مفصل آام کشویی باشد، سرعت زاویه‌ای مجری نهایی به  $q_i$  که حالا  $d_i$  است بستگی ندارد. جهت محاسبه سرعت مطلق در دستگاه پایه باید سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل در یک دستگاه مختصات بیان شوند. بنابراین سرعت زاویه‌ای در دستگاه پایه بصورت زیر بیان می‌شود.

$$W_0^n = W_0^1 + R_0^1 W_1^2 + R_0^2 W_2^3 + \dots + R_0^{n-1} W_{n-1}^n \quad (16-2)$$

معادله (۱۶-۲) با توجه به معادلات (۱۴-۲) و (۱۵-۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$W_0^n = \rho_1 \dot{q}_1 k + \rho_2 \dot{q}_2 R_0^1 k + \dots + \rho_n \dot{q}_n R_0^{n-1} k = \sum_{i=1}^n \rho_i \dot{q}_i z_{i-1} \quad (17-2)$$

که

$$z_{i-1} = R_0^{i-1} k \quad (18-2)$$

اگر مفصل، آام لولایی باشد  $\rho_i = 1$  و اگر کشویی باشد برابر  $\rho_i = 0$  است. بنابراین با توجه به معادله (۱۰-۲) داریم:

$$J_w = [\rho_1 z_0 \quad \rho_2 z_1 \quad \dots \quad \rho_n z_{n-1}] \quad (19-2)$$

که  $z_0 = k = [0 \ 0 \ 1]^T$  است.

## ۲-۳-۲ سرعت خطی

سرعت خطی مجری نهایی به صورت زیر می‌باشد:

$$V_0^n = \dot{d}_0^n \quad (20-2)$$



با استفاده از قانون زنجیره‌ای مشتق داریم:

$$\dot{d}_0^n = \frac{\partial d_0^n}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_n} \dot{q}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial d_0^n}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (21-2)$$

این رابطه همان سرعت خطی مجری نهایی است که در آن، همه مفاصل به جز مفصل آم ثابت نگه داشته شده‌اند و مفصل آم با سرعت واحد رانده می‌شود. این فرض در روابط بعدی نیز صدق می‌کند. چنانچه مفصل آم لولایی باشد، داریم:

$$d_0^n = d_0^1 + R_0^1 d_1^2 + R_0^2 d_2^3 + \dots + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^{n-1} d_{n-1}^n \quad (22-2)$$

بنابراین:

$$\dot{d}_0^n = \dot{d}_0^{i-1} + R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (23-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (23-2) داریم:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^n \quad (24-2)$$

با توجه به رابطه سرعت زاویه‌ای، رابطه فوق بصورت رابطه ضرب خارجی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} (\dot{q}_i k \times d_{i-1}^n) \quad (25-2)$$

با جایگذاری معادله (2-18) و با استفاده از معادله (2-23) می‌توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = \dot{q}_i z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (26-2)$$

بنابراین اگر مفصل آم لولایی باشد با توجه به معادلات (2-11) و (2-20) خواهیم داشت:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \quad (27-2)$$

اگر مفصل آم کشویی باشد داریم:

$$d_{i-1}^i = d_i k + a_i i \quad (28-2)$$

که در رابطه فوق  $i = [1 \ 0 \ 0]^T$  و  $d_i$  و  $a_i$  پارامترهای رابط آم هستند.

با توجه به رابطه (22-2) می توان نوشت:

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + R_0^i d_i^n \quad (29-2)$$

با توجه به فرض ثابت نگه داشته شدن همه مفاصل به جز مفصل آم و رانده شدن آن با سرعت واحد، با مشتق گیری از رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^i \quad (30-2)$$

به کمک معادلات (28-2) و (30-2) می توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_i k \quad (31-2)$$

با توجه به معادله (18-2) داریم:

$$\dot{d}_0^n = z_{i-1} \dot{d}_i \quad (32-2)$$

در مفاصل کشویی  $q_i = d_i$  بنابراین، اگر مفصل آم کشویی باشد با در نظر گرفتن معادله (11-2) ستون آم ماتریس  $J_v$  به صورت زیر است:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad (33-2)$$

در نهایت ماتریس  $J_v$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$J_v = [J_{v_1} \ J_{v_2} \ \dots \ J_{v_n}] \quad (34-2)$$

که  $J/v_i$  اگر مفصل  $i$  لولایی باشد با رابطه (۲-۲۶) و اگر کشویی باشد با رابطه (۲-۳۳) محاسبه می‌گردد. بنابراین ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$J = [J_1 \ J_2 \ \dots \ J_n] \quad (۲-۳۵)$$

که ستون  $i$ ام ماتریس ژاکوبین برای مفصل لولایی به صورت زیر می‌باشد:

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۲-۳۶)$$

و برای مفصل کشویی به این صورت است زیر می‌باشد:

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۲-۳۷)$$

با استفاده از دو رابطه ی آخر به سادگی می‌توان ژاکوبین بازوی ماهر را به دست آورد.

## ۴-۲ معادلات دینامیکی ربات

معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی، با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابطها و مفاصل به دست می‌آید.

### ۱-۴-۲ انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل سیستم، مجموع انرژی پتانسیل رابطهاست که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g^T d_0^{c_i} \quad (۲-۳۸)$$

که در آن جرم رابط  $i$ ام،  $g^T$  بردار شتاب جاذبه در دستگاه  $0$  و  $d_0^{c_i}$  نشان دهنده موقعیت مرکز جرم رابط  $i$ ام در دستگاه  $0$  است.

برای محاسبه  $d_0^{c_i}$  باید مکان مرکز جرم هر رابط را در دستگاه مختصات متصل به همان رابط یعنی  $d_0^{c_i}$  را محاسبه کرده و سپس، به کمک رابطه زیر مقدار  $d_0^{c_i}$  محاسبه گردد:

$$d_0^{c_i} = d_0^i + R_0^i d_i^{c_i} \quad (39-2)$$

## ۲-۴-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی یک ربات عبارتست از مجموع انرژی‌های جنبشی رابط‌های ربات یا به عبارت دیگر برای رابط  $i$  ام انرژی جنبشی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} w_0^{iT} I_0^i w_0^i \quad (40-2)$$

که  $m_i$  جرم رابط  $i$  ام و  $V_{c_i}$  بردار سرعت‌های خطی مرکز جرم رابط  $i$  ام و  $w_0^i$  بردار سرعت زاویه‌ای رابط  $i$  ام نسبت به دستگاه مختصات پایه و  $I_0^i$  ماتریس ممان‌های اینرسی رابط  $i$  ام نسبت به دستگاه مختصات پایه می‌باشد.

برای آنکه بتوان ماتریس ممان اینرسی را مستقل از حرکت جسم محاسبه نمود لازم است ماتریس ممان اینرسی را در دستگاهی متصل به همان رابط محاسبه کرد، که در اینصورت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب شده است. داریم

$$I_0^i = R_0^i I_i R_0^{iT} \quad (41-2)$$

بنابر این رابطه (۴۰-۲) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (42-2)$$

که  $R_0^i$  ماتریس دورانی است که بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل می‌کند.  $I_i$  ماتریس ممان اینرسی رابط آم در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_i = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz dm & - \int yz dm & \int (y^2 + x^2) dm \end{bmatrix} \quad (۴۳-۲)$$

که  $x, y, z$  مختصات نقطه‌ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط آم می‌باشد.

معادله (۴۳-۲) را می‌توان به فرم کلی زیر نوشت:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (۴۴-۲)$$

با توجه به معادله (۴۲-۲) رابطه انرژی جنبشی ربات را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_0^{iT} R_0^i I_i R_0^{iT} w_0^i \quad (۴۵-۲)$$

باتوجه به روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) می‌توان نوشت:

$$V_{c_i} = J_{V_{c_i}} \dot{q} \quad (۴۶-۲)$$

$$w_0^i = J_{w_0^i} \dot{q} \quad (۴۷-۲)$$

برای محاسبه  $J_{V_{c_i}}$  باید از  $d_0^{c_i}$  بجای  $d_0^n$  در معادله (۲۷-۲) استفاده نمود. بنابراین طبق توضیحات قبلی دوباره به رابطه (۳۹-۲) برای محاسبه  $d_0^{c_i}$  نیاز است. با جایگذاری روابط (۴۶-۲) و (۴۷-۲) در رابطه اصلی (۴۵-۲) داریم:

$$k = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{V_{c_i}}^T V_{c_i} + J_{w_i}^T R_0^i I_i R_0^{iT} J_{w_i}] \dot{q} \quad (48-2)$$

بنابراین رابطه (48-2) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$k = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (49-2)$$

که در آن ماتریس  $D(q)$  عبارتست از:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{V_{c_i}}^T V_{c_i} + J_{w_i}^T R_0^i I_i R_0^{iT} J_{w_i}] \quad (50-2)$$

انرژی پتانسیل ربات را به کمک رابطه (2-38) و انرژی جنبشی ربات به کمک رابطه (2-49) محاسبه می‌شود. اکنون به تشکیل تابع لاگرانژین ربات پرداخته می‌شود.

$$L = K - V \quad (51-2)$$

معادله کلی دینامیکی سیستم عبارتست از:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial V}{\partial q} \quad (52-2)$$

که در این رابطه  $\tau$  بردار گشتاور برای مفاصل لولایی و نیرو برای مفاصل کشویی است. استفاده از معادلات (2-49) تا (2-51) در معادله (2-52) و ساده‌سازی روابط، معادله نهایی زیر بدست می‌آید:

$$\tau = D(q) \ddot{q} + \dot{D}(q) \dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) + \frac{\partial V}{\partial q} \quad (53-2)$$

در نهایت، معادله دینامیکی ربات به این صورت نمایش داده می‌شود:

$$\tau = D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \quad (54-2)$$

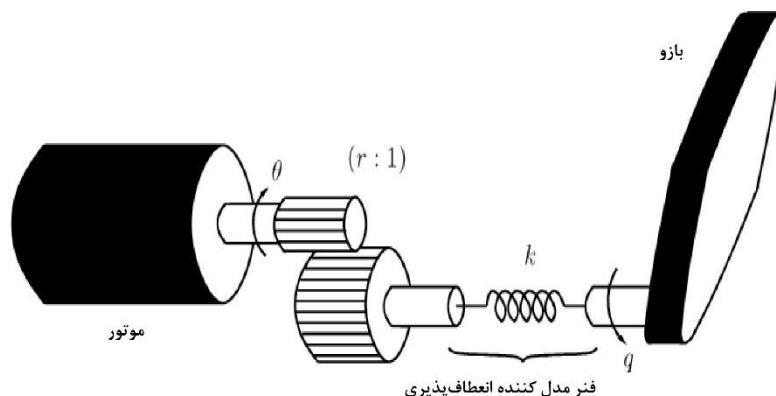
که در آن  $D(q)$  ماتریس  $n \times n$  اینرسی ربات،  $C(q, \dot{q})$  بردار گشتاور کوریولیس و جانب مرکز و  $G(q)$  بردار گشتاور گرانشی است.

$$C(q, \dot{q})\dot{q} = \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) \quad (55-2)$$

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q} \quad (56-2)$$

## ۵-۲ معادلات حالت ربات با حضور محرکه‌ها

محرکه‌های ربات که در اغلب موارد موتورهای الکتریکی هستند، گشتاور لازم برای حرکت مفاصل ربات را فراهم می‌کنند. در سیستم انتقال قدرت موتورها به دلیل وجود المان‌هایی نظیر چرخ‌دنده انعطاف‌پذیری به وجود می‌آید. که این انعطاف را با فنر مدل می‌کنند. این پدیده باعث پیچیده شدن معادلات موتور شده و برای همین در بسیاری از تحلیل‌ها از آن صرف نظر می‌شود. این صرف نظر کردن در بعضی از موارد حتی باعث ناپایداری سیستم شده و باعث می‌شود که به درستی نتوان سیستم را کنترل کرد.



شکل ۱-۲ مدل مفصل انعطاف‌پذیر [۶۰].

با توجه به مطالب بیان شده موتورها یک بخش اصلی از دینامیک سیستم رباتیک را تشکیل می دهند. گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورها با رابطه زیر فراهم می شود [۵۵].

$$J\ddot{\theta}_m + B\dot{\theta}_m + r\tau_r = \tau_m \quad (۵۷-۲)$$

$\tau_m$  بردار گشتاور تولیدی موتورها برای هر مفصل و  $\theta_m$  بردار زاویه موتورها می باشد.  $B, J$  و  $r$  ماتریس های قطری  $n \times n$  به ترتیب از جمع ممان اینرسی های روتورها، ثابت میرایی چرخشی و ضریب کاهنده چرخنده ( $0 < r < 1$ ) است. از طرفی:

$$\tau_r = k(r\theta_m - q) \quad (۵۸-۲)$$

$k$  ماتریس قطری ضرایب سختی فنرهای مدل کننده انعطاف پذیری در مفاصل است.

برای ساده سازی مدل، هردو ضریب چرخنده و ضریب سختی مفاصل ثابت و بردار نیروهای گرانشی، فقط تابعی از موقعیت مفاصل فرض شده است.

$$\tau_r = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۵۹-۲)$$

با برابر قرار دادن دو معادله بالا داریم:

$$k^{-1}r^{-1}(D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) + r^{-1}q = \theta_m \quad (۶۰-۲)$$

$$k^{-1}r^{-1}(D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) = \theta_f \quad (۶۱-۲)$$

$$\theta_f + r^{-1}q = \theta_m \quad (۶۲-۲)$$

$\theta_f$  ترمی است که به دلیل وجود اثر انعطاف به دست می آید و در ربات های صلب وجود ندارد.

برای بدست آوردن ولتاژ موتورها به عنوان ورودی کنترلی سیستم باید از معادلات موتور DC مغناطیس دائم به عنوان محرک استفاده کرد که به فرم ماتریسی زیر می باشد:



$$RI_a + LI_a + K_b \dot{\theta}_m = V \quad (۶۳-۲)$$

که  $V \in R^n$  بردار ولتاژ موتورها،  $I_a \in R^n$  بردار جریان آرمیچر و  $\dot{\theta}_m \in R^n$  بردار سرعت موتورها است.  $L, R, K_b$  ماتریس های قطری  $n \times n$  به ترتیب از اندوکتانس آرمیچر، ثابت مقاومت آرمیچر و ثابت ضد محرکه است.

بردار گشتاور  $\tau_m$ ، توسط بردار جریان موتور به صورت زیر بدست می آید:

$$K_m I_a = \tau_m \quad (۶۴-۲)$$

که  $K_m$  ماتریس قطری از ثابت گشتاور است.

روابط (۶۴-۲) تا (۵۷-۲) یک سیستم دینامیکی را تشکیل می دهد. ولتاژ  $V$  به عنوان ورودی و بردار زاویه مفاصل،  $q$ ، به عنوان خروجی سیستم می باشد. فرم فضای حالت سیستم به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\dot{x} = f(x) + b V \quad (۶۵-۲)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ D^{-1}(x_1)(-g(x_1) - Kx_1 - C(x_1, x_2)x_2 + Krx_3) \\ x_4 \\ J^{-1}(rKx_1 - r^2Kx_3 - Bx_4 + K_mx_5) \\ -L^{-1}(K_b x_4 + Rx_5) \end{bmatrix} \quad (۶۶-۲)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L^{-1} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ I_a \end{bmatrix}$$

مدل فضای حالت بیان شده توسط (۲-۶۵)، یک سیستم بزرگ بسیار غیر خطی و همراه با تزویج بالا را نشان می‌دهد که بردار  $x$  با ابعاد  $5n * 1$  به عنوان بردار حالت می‌باشد. همچنین فضای حالت بیان شده به فرم همراه نیست. گرچه با محاسبات زیاد می‌توان به فرم همراه درآورد. با توجه به پیچیدگی‌های این سیستم که بیان شد، طراحی یک کنترل‌کننده قوی با محاسبات زیادی همراه خواهد بود.

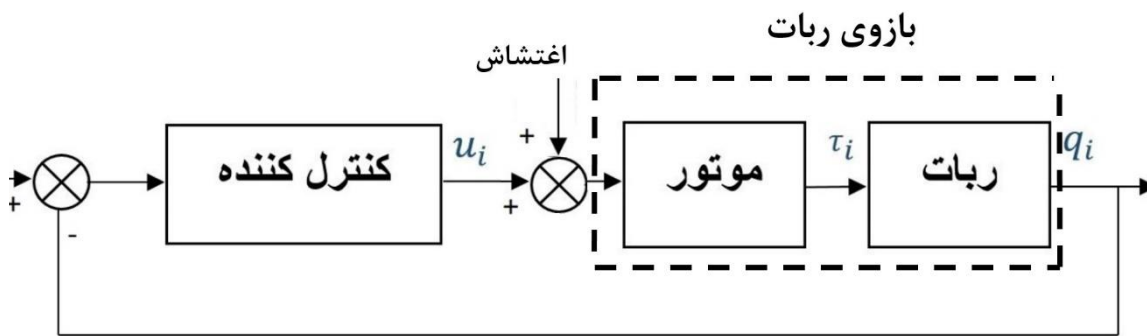
# فصل سوم راهبرد کنترل و لتاژ

## ۳-۱ راهبرد کنترل ولتاژ

مفاصل ربات، توسط موتورهای آن به حرکت در می‌آیند، بنابراین می‌توان مسئله کنترل ربات را به مسئله کنترل موتورهای آن تبدیل کرد و کل سیستم ربات همراه با موتورهای آن را به عنوان یک سیستم واحد در نظر گرفت. بنابراین به جای کنترل گشتاور مفاصل می‌توان به کنترل ولتاژ موتورهای مفاصل پرداخت. در این صورت سیگنال کنترلی ورودی، ولتاژ موتورهای ربات خواهد بود.

موتور الکتریکی توسط منبع ولتاژ تغذیه می‌شود. بنابراین برای کنترل جریان موتور نیز، باید ولتاژ آن کنترل شود. کارهای بسیاری در حوزه کنترل ولتاژ موتورهای الکتریکی صورت پذیرفته است. اگر از موتور مغناطیس دائم DC استفاده شود این موتور بدلیل داشتن دینامیک خطی، راحتی قابل کنترل است. مدل موتور الکتریکی بسیار ساده تر از مدل ربات است. بنابراین، طراحی کنترل کننده بر مبنای مدل موتور، بسیار ساده تر از طراحی آن بر مبنای مدل ربات است. در این نوع طراحی، ربات به عنوان بار موتور دیده شده و دینامیک‌های ربات در جریان موتور ظاهر می‌شود. برای کنترل موقعیت هر مفصل، در واقع زاویه موتور آن مفصل کنترل می‌شود. بدین ترتیب، کنترل سیستم چند متغیره ربات، تبدیل به کنترل موتورهای آن می‌شود که یک سیستم یک ورودی - یک خروجی است و با کنترل جداگانه هر مفصل بسادگی می‌توان ربات مورد نظر را کنترل نمود. استراتژی کنترل ولتاژ ربات بر مبنای مدل موتور و مستقل از مدل ربات نخستین بار در [۸] معرفی شده است.

بهره‌مندی از مجزاسازی کامل، محاسبات کم و سرعت در انجام محاسبات، سادگی طراحی و دقت بالای آن و مقاوم بودن سیستم کنترل نسبت به دینامیک‌های ربات، راهبرد کنترل ولتاژ ربات را بر راهبرد کنترل گشتاور برتری می‌دهد. این راهبرد بدلیل صرف نظر نکردن از دینامیک محرکه‌ها، عملکرد کنترلی بهتری خواهد داشت و برای ردگیری با سرعت بالا مناسب می‌باشد.



شکل ۱-۳ دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات بصورت مفصل مستقل

شکل (۱-۳) دیاگرام کنترل ولتاژ موتور مفصل ربات را نشان می‌دهد.

با توجه به رابطه (۲-۵۷) برای مدل موتور، خواهیم داشت:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau_r = \tau_m \quad (۱-۳)$$

در این رابطه ربات به عنوان بار موتور  $\tau_r$  در نظر گرفته شده است.

رابطه بردار گشتاور موتور،  $\tau_m$ ، و جریان موتور،  $I_a$ ، به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau_m = K_m I_a \quad (۲-۳)$$

که  $K_m$  ماتریس قطری از ثابت گشتاور است.

با جایگذاری معادله (۱-۳) در (۲-۳) داریم:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau_r = K_m I_a \quad (۳-۳)$$

همانگونه که در رابطه (۳-۳) مشخص است، تمام ترم‌های غیرخطی ربات  $\tau_r$  در جریان موتور  $I_a$  موجود

می‌باشد. بنابراین برای کنترل ربات می‌توان جریان موتور را کنترل نمود. در موتورهای مغناطیس دائم

DC داریم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = V \quad (4-3)$$

که  $V$  ولتاژ موتور،  $I_a$  جریان موتور،  $\theta_m$  زاویه موتور،  $R$ ،  $L$  و  $K_b$  به ترتیب معرف ثابت مقاومت آرمیچر، اندوکتانس آرمیچر و ثابت ضد محرکه است. بنابراین همانطور که از رابطه (۴-۳) مشخص است، برای کنترل جریان موتور باید ولتاژ آن را کنترل نمود.

# فصل چہارم کنترل تطبیقی

## ۴-۱ کنترل کننده تطبیقی

برای داشتن تکرارپذیری و دقت بیشتر در عملکرد سیستم رباتیک، نیاز به استفاده از یک سیستم کنترل است که بتواند با تغییرات پویای سیستم رباتیک، عملکرد مناسبی داشته باشد. کنترل تطبیقی قادر به تنظیم به یک بازو رباتیک با پارامترهایی است که به طور مداوم تغییر می کنند، یا به طور کل ناشناخته است.

در سیستم‌هایی که کنترل عملکرد تطبیقی ندارد، سیستم کنترل بر پایه داده‌های پیشین سیستم مدل‌سازی می‌شود، به عبارت دیگر، سیستم را می‌شناسیم و کنترل کننده را فقط برای این سیستم طراحی می‌کنیم و فرض می‌کنیم که تغییری در سیستم ایجاد نمی‌شود. کنترل کننده تطبیقی، به اطلاعات قبلی از سیستم متکی نیست و اگر برخی از تغییرات تصادفی در اطراف اتفاق بیفتد، کنترل کننده قادر به کنترل آن از طریق تنظیم به حالت‌های تغییر یافته است. اگر سیستم با تداخل نامشخص مواجه شود، یا انتظار می‌رود که تغییرات پارامترهای آن را به نحوی که از ابتدا پیش بینی نشده است تحمل کند، در این وضعیت از کنترل تطبیقی استفاده می‌کنیم [۲۷].

## ۴-۲ کنترل کننده تطبیقی مستقیم:

یک روش کنترل تطبیقی مستقیم، بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ ارائه می‌شود:

با توجه به رابطه (۲-۶۳) برای هر موتور داریم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = v \quad (1-4)$$

که  $R$ ،  $L$  و  $K_b$  پارامترهای موتور،  $\dot{\theta}_m$  سرعت موتور و  $v$  ولتاژ موتور می‌باشد.



متغیر  $d$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d = LI_a + K_b \dot{\theta}_m - \ddot{q} \quad (۲-۴)$$

که  $\ddot{q}$  شتاب مفاصل می‌باشد.

رابطه (۱-۴) را با توجه به (۲-۴) می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$RI_a + \ddot{q} + d = v \quad (۳-۴)$$

قانون کنترل ایده‌آل، به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$v = RI_a + \ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) + k_i \left( \int q_d dt - \int q dt \right) + d \quad (۴-۴)$$

که  $q$  و  $\dot{q}$  مسیر و سرعت مفصل،  $q_d$ ،  $\dot{q}_d$  و  $\ddot{q}_d$  به ترتیب مسیر مطلوب، سرعت مطلوب و شتاب مطلوب و همچنین  $k_i$ ،  $k_p$  و  $k_d$  پارامترهای ثابت طراحی کنترل می‌باشند.

با تعریف  $e = q_d - q$  به عنوان خطای ردگیری و  $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$  و  $\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$  و با جایگذاری معادله (۴-۴) در معادله (۳-۴)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt = 0 \quad (۵-۴)$$

به دلیل وجود عدم قطعیت‌های پارامتری، قانون کنترل پیشنهادی (۴-۴)، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$v = \hat{R}I_a + \ddot{q}_d + k_d \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt + \hat{d} \quad (۶-۴)$$

که در آن  $\hat{R}$  و  $\hat{d}$  به ترتیب مقادیر تخمینی  $R$  و  $d$  بوده و توسط قوانین تطبیق، تخمین زده می‌شوند. پارامتر  $R$  ثابت بوده ولی  $d$  نیز با توجه به زمان نمونه‌برداری بالا سیستم نسبت به سرعت سیستم، ثابت

فرض می‌شود که در کنترل تطبیقی معتبر است. به عبارت دیگر تغییرات  $d$  در بازه نمونه‌برداری به اندازه کافی آهسته است [۵۸]-[۵۶].

با جایگذاری رابطه (۶-۴) در رابطه (۳-۴)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$(R - \hat{R})I_a + (d - \hat{d}) + (\ddot{q} - \ddot{q}_d) - k_d \dot{e} - k_p e - k_i \int e dt = 0 \quad (7-4)$$

با تعریف  $\tilde{R} = R - \hat{R}$  و  $\tilde{d} = d - \hat{d}$  برای رابطه (۷-۴) داریم:

$$\ddot{e} = \tilde{R}I_a + \tilde{d} - k_d \dot{e} - k_p e - k_i \int e dt \quad (8-4)$$

رابطه (۸-۴) به فرم فضای حالت، به صورت زیر بازنویسی شده است:

$$\dot{E} = AE + BW \quad (9-4)$$

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_i & -k_p & -k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int e \\ e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\tilde{R}I_a + \tilde{d}) \quad (10-4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_i & -k_p & -k_d \end{bmatrix} \quad .B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad .w = (\tilde{R}I_a + \tilde{d}) \quad (11-4)$$

تابع معین مثبت لیاپانوف به صورت زیر پیشنهاد داده می‌شود:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} E^T P E + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{R}^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{d}^2 \quad (12-4)$$

که در آن  $\gamma_1 > 0$  و  $\gamma_2 > 0$  بهره‌های ثابت هستند.

$P$  یک ماتریس معین مثبت است که در رابطه  $A^T P + PA = -Q$  صدق می‌کند.  $Q$  یک ماتریس معین مثبت دلخواه می‌باشد.

مشتق‌گیری از رابطه (۱۲-۴) نتیجه می‌دهد:

$$\dot{F} = \frac{1}{2} E^T (A^T P + PA) E + E^T P B W + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{R} \dot{R} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{d} \dot{d} \quad (۱۳-۴)$$

هدف ما بردن بردار خطا به سمت صفر می‌باشد ( $e \rightarrow 0$ ). با تنظیم پارامترهای  $\hat{R} \rightarrow R$  و  $\hat{d} \rightarrow d$  می‌توان به آن دست یافت. اگر  $\dot{F} < 0$  نتیجه می‌دهد  $e \rightarrow 0$ .

با استفاده از رابطه (۱۳-۴) قوانین تطبیق به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{R} = -\gamma_1 E^T P B I_a \quad (۱۴-۴)$$

$$\dot{d} = -\gamma_2 E^T P B$$

انتگرال‌گیری از طرفین روابط (۱۴-۴) نتیجه می‌دهد:

$$\hat{R} = -\gamma_1 \int_0^t E^T P B I_a dt + \hat{R}(0) \quad (۱۵-۴)$$

$$\hat{d} = -\gamma_2 \int_0^t E^T P B dt + \hat{d}(0)$$

## ۳-۴ تحلیل پایداری:

با توجه به قوانین تطبیق بدست آمده از رابطه (۴-۱۵)، رابطه (۴-۱۳) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\mathbf{F}} = -\frac{1}{2}E^T Q E \leq 0 \quad (۴-۱۶)$$

باتوجه به رابطه (۴-۱۶)، مشتق تابع لیاپانوف  $\mathbf{F}$  نسبت به زمان، معین نیمه منفی می‌باشد. در نتیجه  $\mathbf{F}$  محدود است و متغیرهای سازنده  $\mathbf{F}$  محدود می‌باشد. پس نتیجه می‌شود  $E$  محدود است.

با توجه به لم باربالات چون  $\mathbf{F}$  مشتق پذیر و کراندار است، در نتیجه اگر  $\dot{\mathbf{F}}$  به صورت یکنواخت پیوسته باشد  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{F} \rightarrow 0$  می‌باشد. یک شرط کافی برای اینکه یک تابع مشتق‌پذیر به صورت یکنواخت پیوسته باشد آن است که مشتق آن تابع محدود باشد. بنابراین برای اثبات پیوسته یکنواخت بودن بودن  $\dot{\mathbf{F}}$  کافی است، محدود بودن  $\ddot{\mathbf{F}}$  اثبات شود.

$$\ddot{\mathbf{F}} = -\frac{1}{2}E^T Q \dot{E} - \frac{1}{2}\dot{E}^T Q E \quad (۴-۱۷)$$

برای محدود بودن  $\ddot{\mathbf{F}}$ ، با توجه به محدود بودن  $E$ ، باید  $\dot{E}$  محدود باشد. با توجه به رابطه (۴-۹) برای اثبات محدود بودن  $\dot{E}$  باید محدود بودن متغیرهای سازنده آن اثبات شود.

برای محافظت از موتورها در برابر اضافه ولتاژ، ورودی ولتاژ محدود فرض می‌شود:

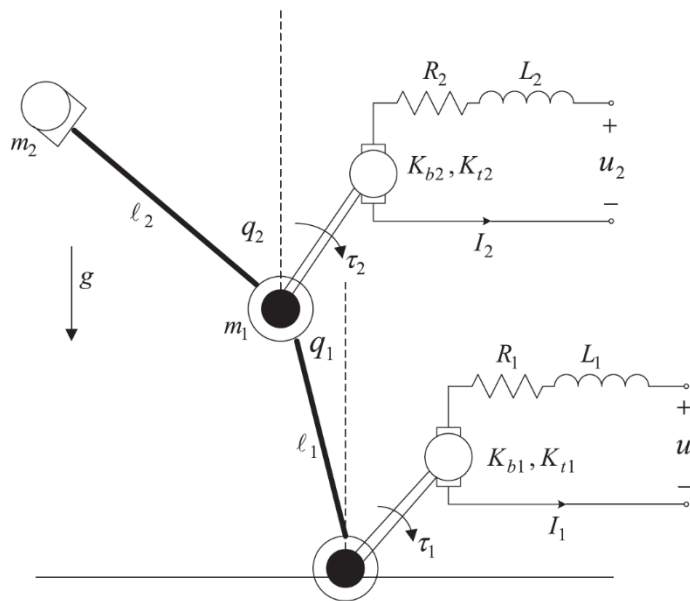
$$V < V_{max} \quad (۴-۱۸)$$

با توجه به محدود بودن ولتاژ موتور و باتوجه به رابطه (۴-۱)، محدود بودن  $I_a$  اثبات می‌شود.

با محدود بودن  $\ddot{\mathbf{F}}$  و با توجه به لم باربالات، با میل کردن  $\mathbf{F}$  به سمت صفر، سیستم مسیر مطلوب را ردگیری کرده و  $e \rightarrow 0$  می‌رود.

## ۴-۴ شبیه سازی

برای شبیه سازی قانون کنترل پیشنهادی (۴-۶) ربات دو محوره با مفاصل انعطاف پذیر مورد ارزیابی قرار می گیرد.



شکل ۴-۱ ربات دو محوره با محرک موتور دیسی [۵۹]

ربات مورد مطالعه یک ربات سری با دو مفصل لولایی می باشد که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. ماتریس متقارن ممان اینرسی فضای مفصلی  $(D(q))$ ، بردار گشتاورهای کوریولیس و جانب مرکز  $(C(q, \dot{q})\dot{q})$ ، بردار توصیف کننده نیروهای گرانشی  $(G(q))$  بصورت زیر هستند [۷].

$$D(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1} + m_2(l_1^2 + l_{c1}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2 & m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2 \\ m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \quad (19-4)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) & -m_2 l_1 l_{c2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (20-4)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 I_1) g \cos(q_1) + m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (21-4)$$

که  $l_i$  طول مفصل،  $m_i$  جرم مفصل،  $I_i$  ممان اینرسی،  $l_{ci}$  فاصله مرکز مفصل تا مفصل  $i$ ، هستند.

جدول ۴-۱ پارامترهای موتور

موتورها	$k$	$r$	$B$	$J$	$L$	$k_b$	$R$	$u$
۱،۲	۵۰۰	۰،۰۲	۰،۰۰۱	۰،۰۰۰۲	۰،۰۰۱	۰،۲۶	۱،۶	۴۰

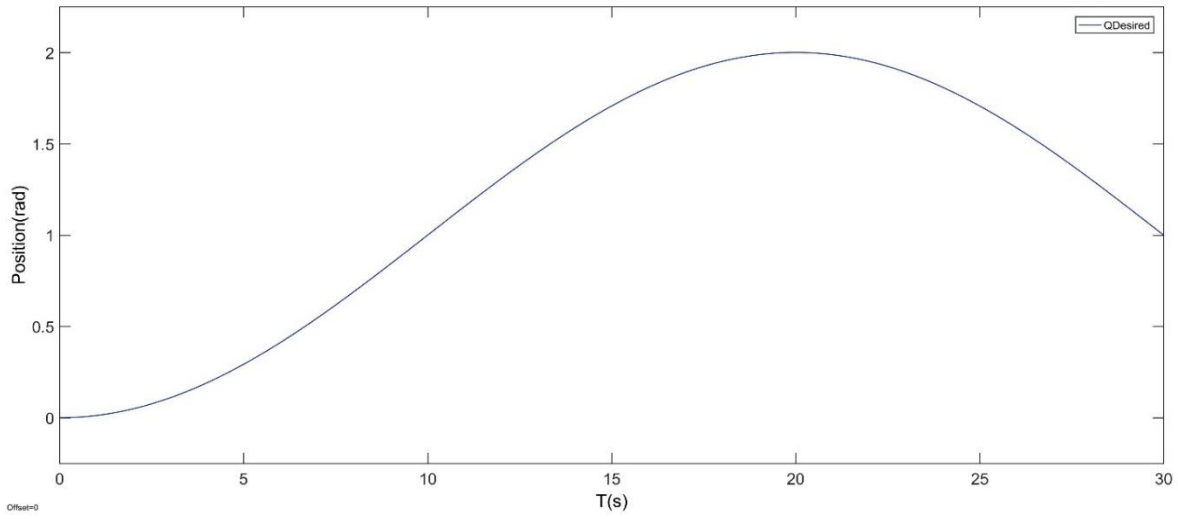
جدول ۴-۲ پارامترهای دینامیک ربات

محورها	$I(kgm^2)$	$m$	$l_c(m)$	$l(m)$
۱	۰،۱۲	۱	۰،۵	۱
۲	۰،۲۵	۲	۰،۵	۱

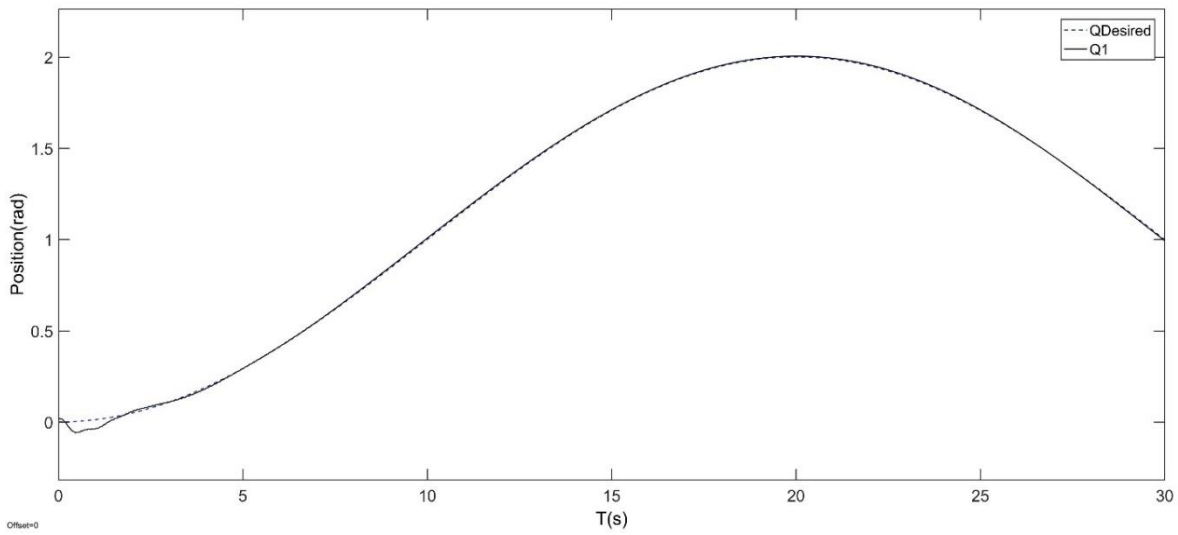
پارامترهای موتور ربات و پارامترهای دینامیکی بترتیب در جدول (۴-۱) و (۴-۲) آمده است. علاوه بر این برای حفاظت از موتورها حداکثر ولتاژ قابل اعمال به موتورها  $40V$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۴-۱ کنترل ردگیری

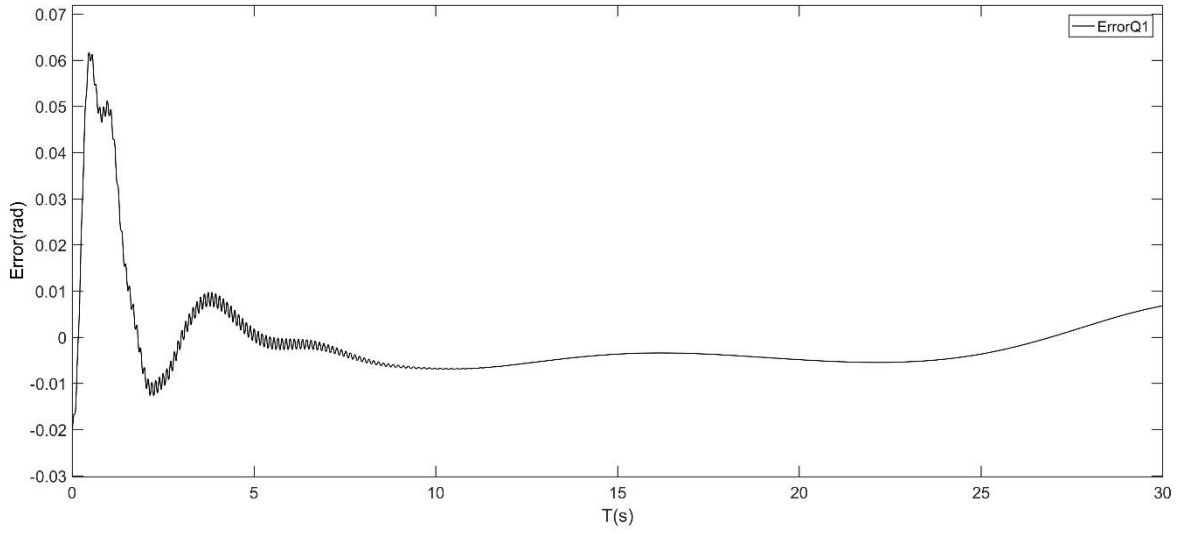
به بررسی عملکرد کنترل کننده در کنترل ردگیری مسیر مطلوب می پردازیم. برای کنترل ردگیری مسیر مطلوب، باید نرم باشد [۸]. مسیر مطلوب برای هر مفصل  $q_d = 1 - \cos(\frac{\pi t}{20})$  در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۲). ضرایب قوانین تطبیق با روش سعی و خطا بدست آمده اند. عملکرد سیستم به صورت زیر است.



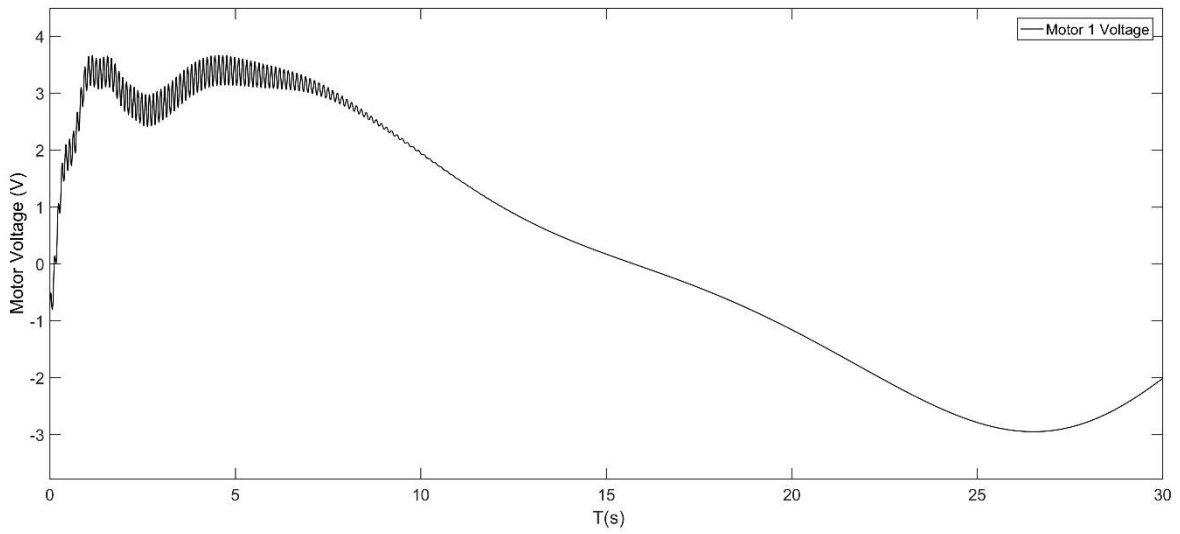
شکل ۲-۴ مسیر مطلوب هر مفصل



شکل ۳-۴ ردیابی مفصل اول همراه با مسیر مطلوب

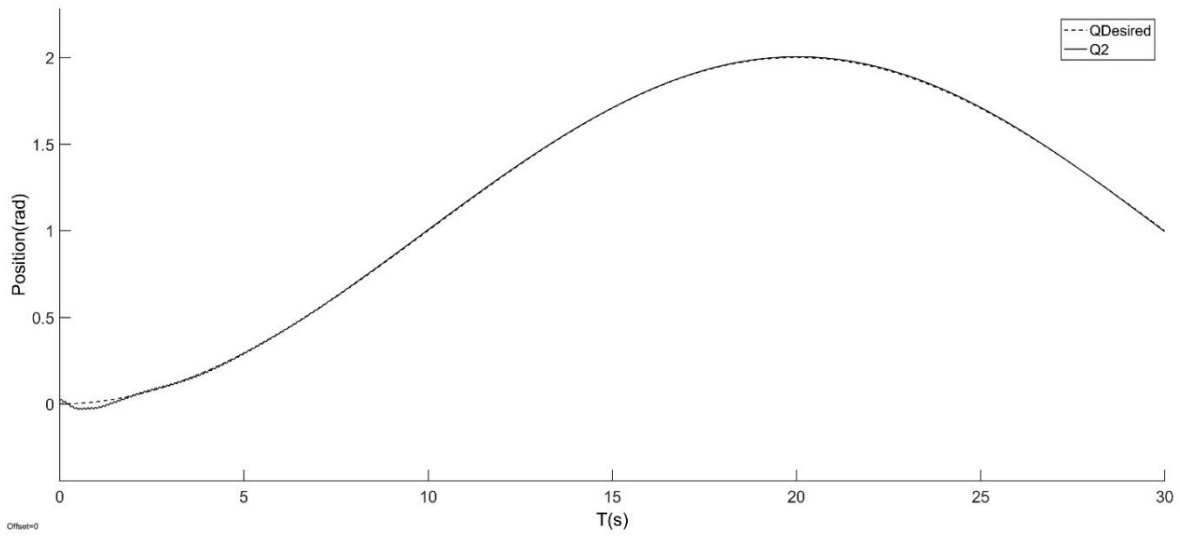


شکل ۴-۴ خطای ردگیری مفصل اول

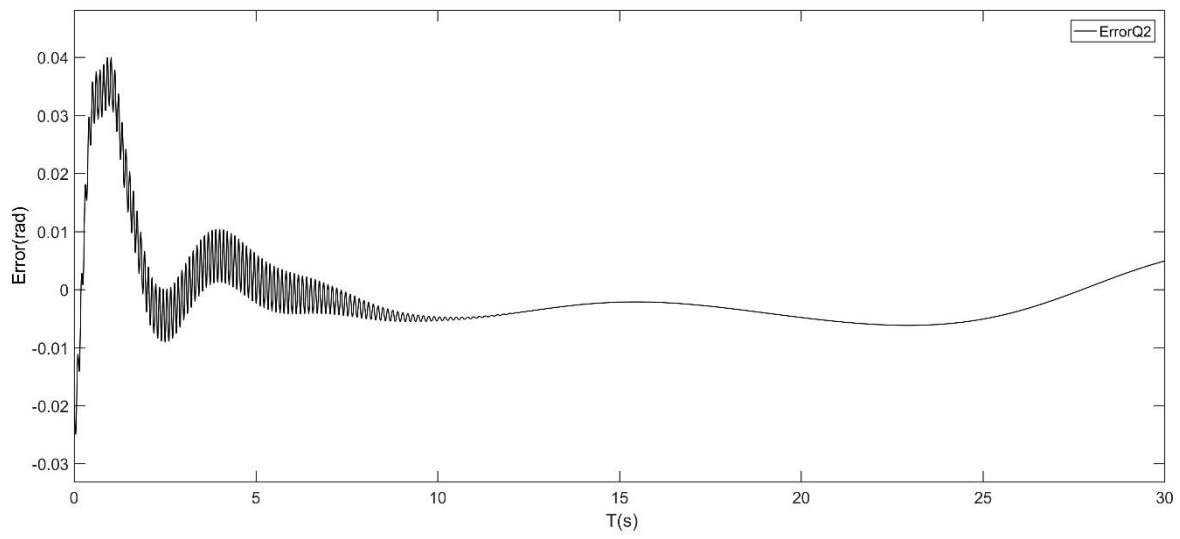


شکل ۴-۵ ولتاژ موتور اول

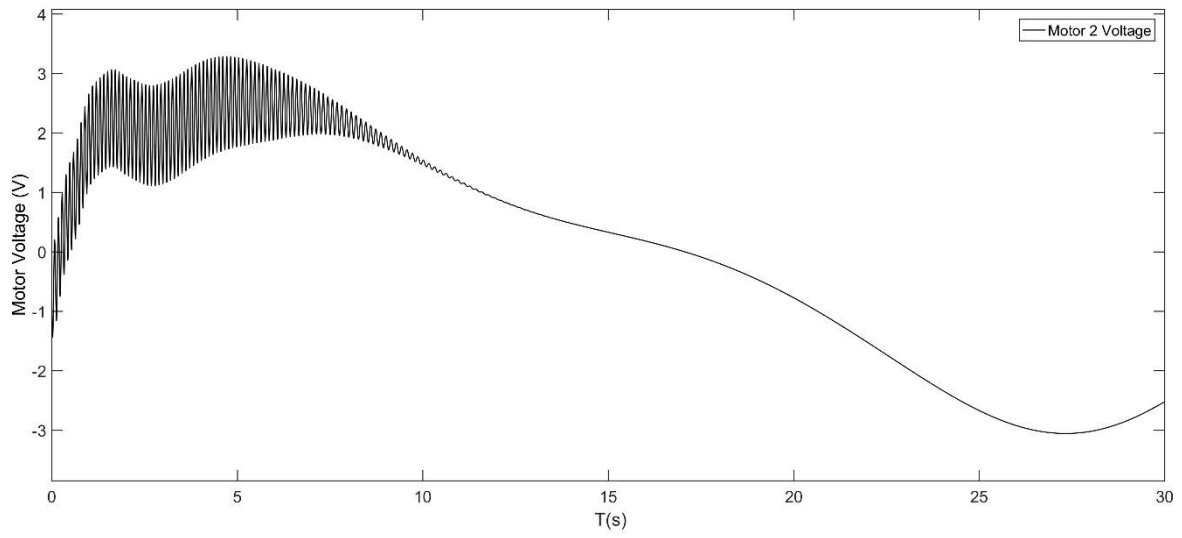




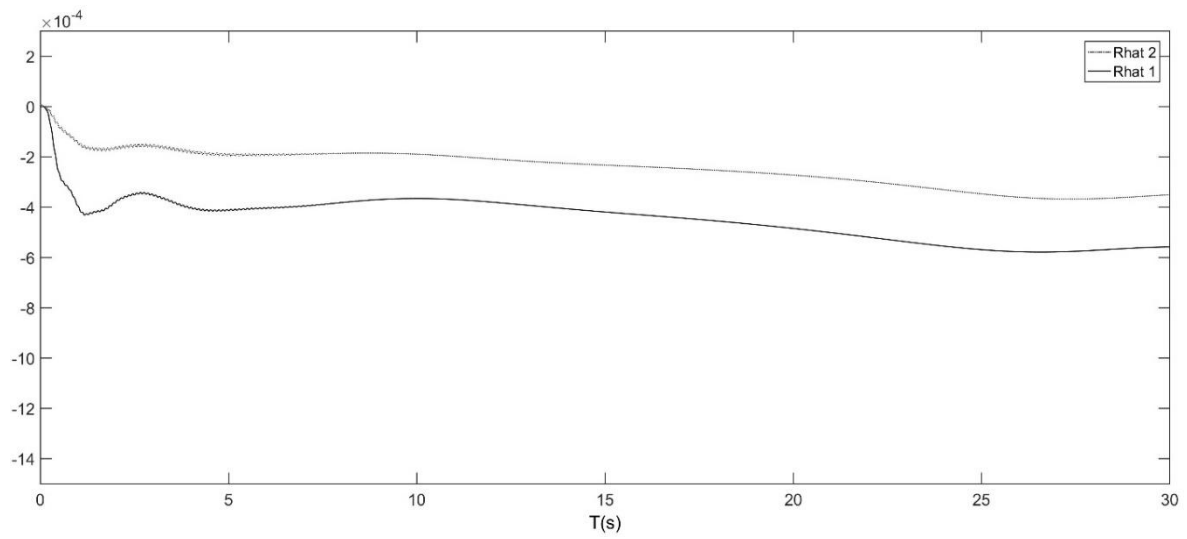
شکل ۴-۶ ردیابی مفصل دوم همراه با مسیر مطلوب



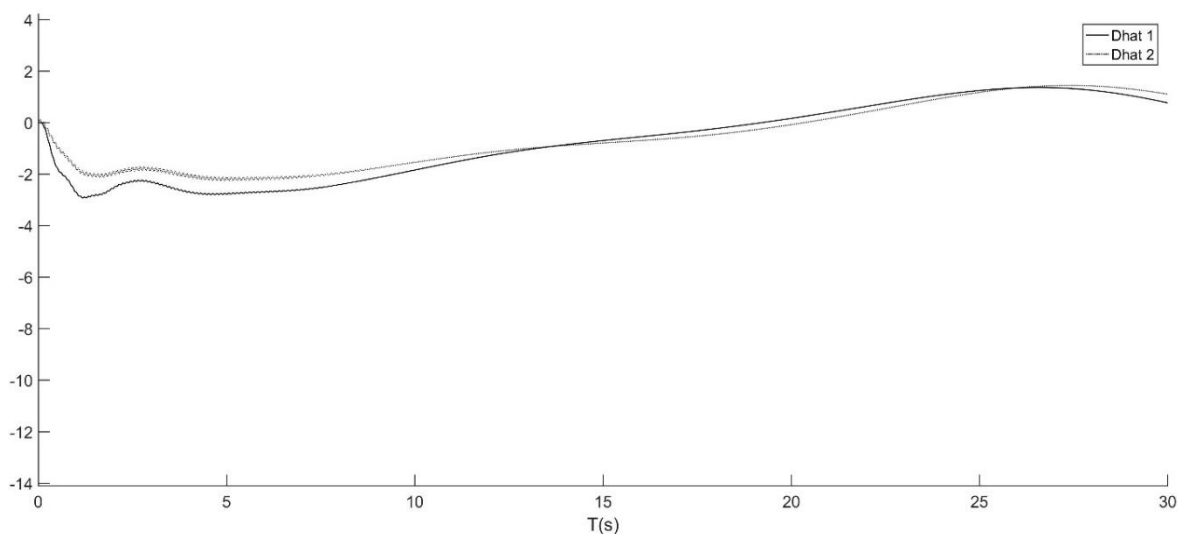
شکل ۴-۷ خطای ردگیری مفصل دوم



شکل ۴-۸ ولتاژ موتور دوم



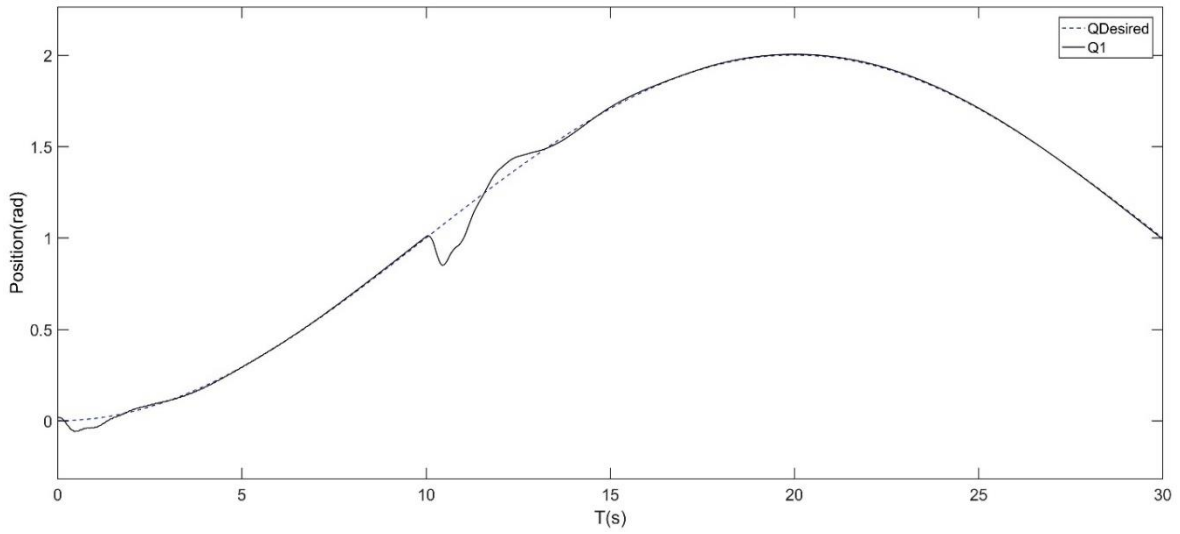
شکل ۴-۹ پارامترهای تطبیق  $\hat{R}$



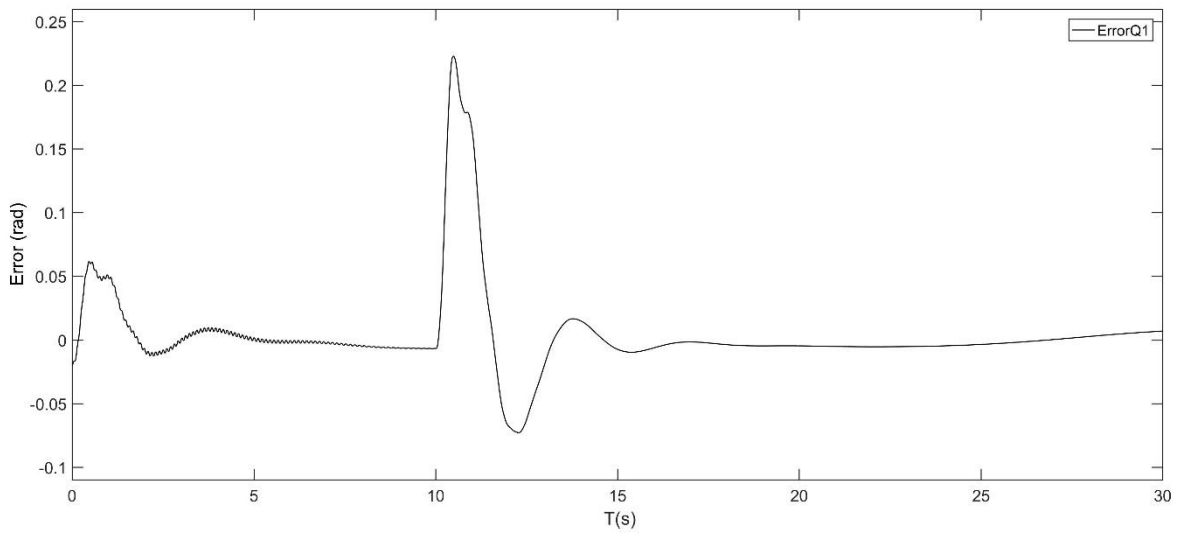
شکل ۴-۱۰ پارامترهای تطبیق  $\hat{d}$

شکل (۳-۴) و (۶-۴) عملکرد سیستم کنترل تطبیقی را برای حالت ردگیری مسیر مطلوب نشان می‌دهند. خطای ردگیری مفصل اول و مفصل دوم به ترتیب در شکل‌های (۴-۴) و (۷-۴) نشان داده شده است که همانطور مشاهده می‌شود، خطای ردگیری کوچک می‌باشد و ردگیری به خوبی انجام داده شده است. ولتاژ موتورها همانطور که در شکل‌های (۵-۴) و (۸-۴) مشاهده می‌شود، مطلوب بوده و نرم می‌باشد. در شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) فرایند تطبیق پارامترها نمایش داده شده است.

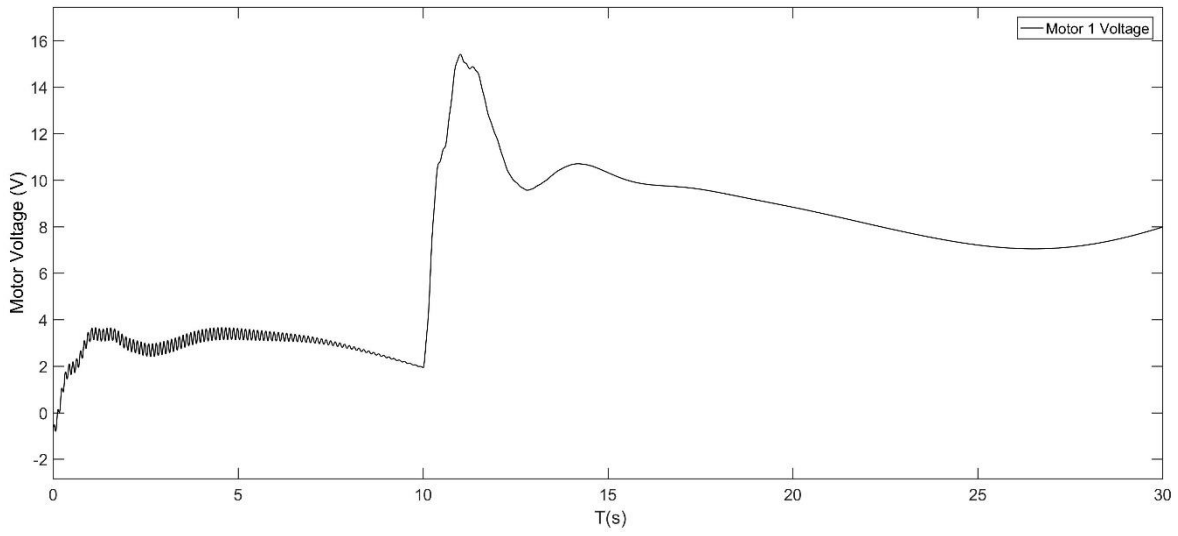
عملکرد سیستم در برابر اغتشاش خارجی، به صورت زیر می‌باشد. (اغتشاش خارجی، به صورت تابع پله به ورودی ولتاژ کنترلی مفصل اول اعمال شده است.)



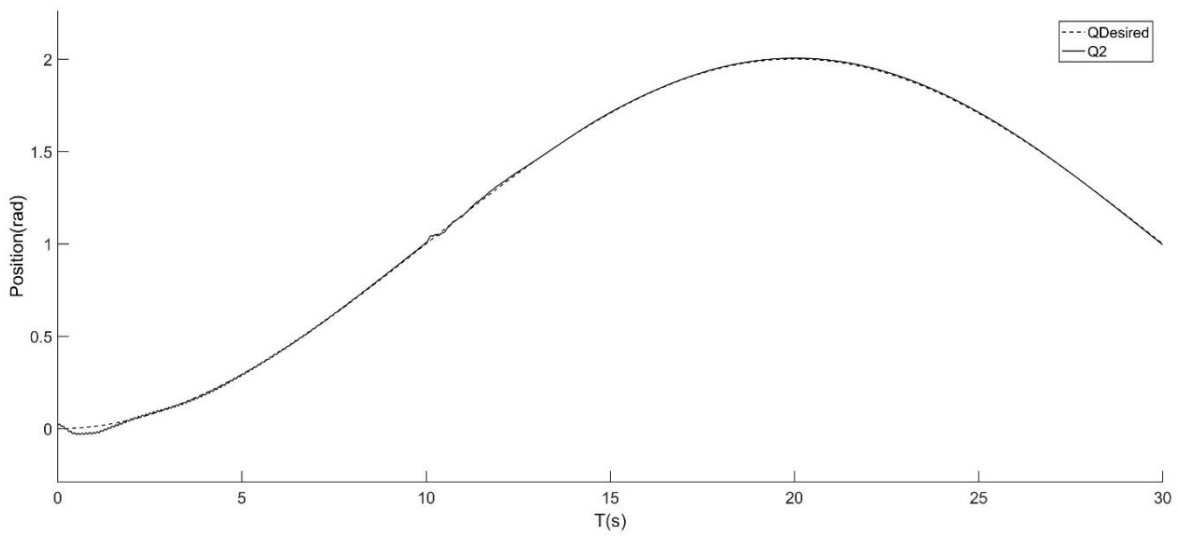
شکل ۴-۱۱ ردیابی مفصل اول همراه با مسیر مطلوب با حضور اغتشاش خارجی



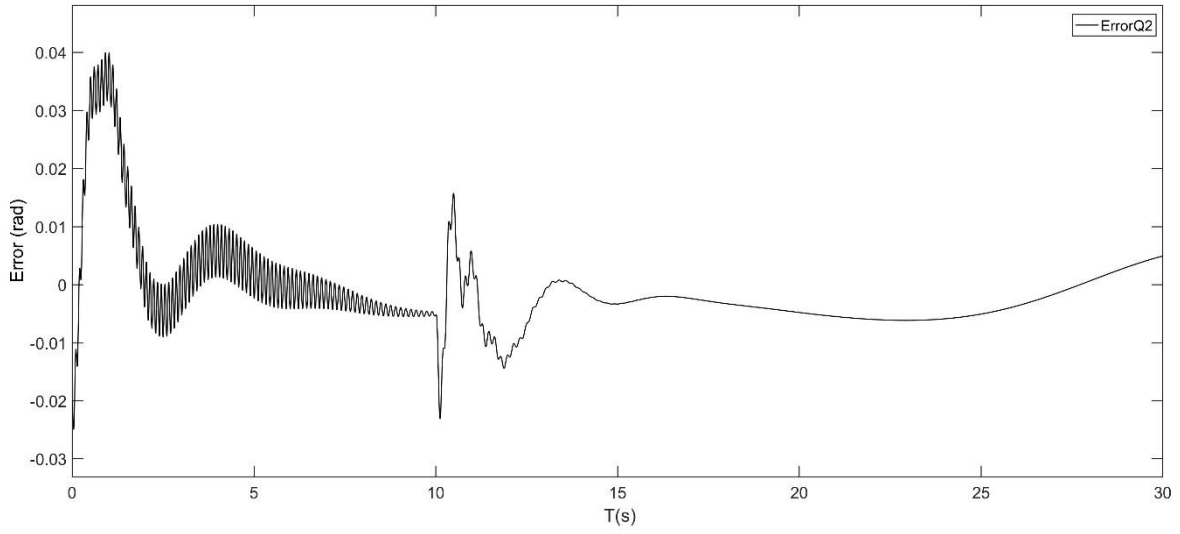
شکل ۴-۱۲ خطای ردگیری مفصل اول با حضور اغتشاش خارجی



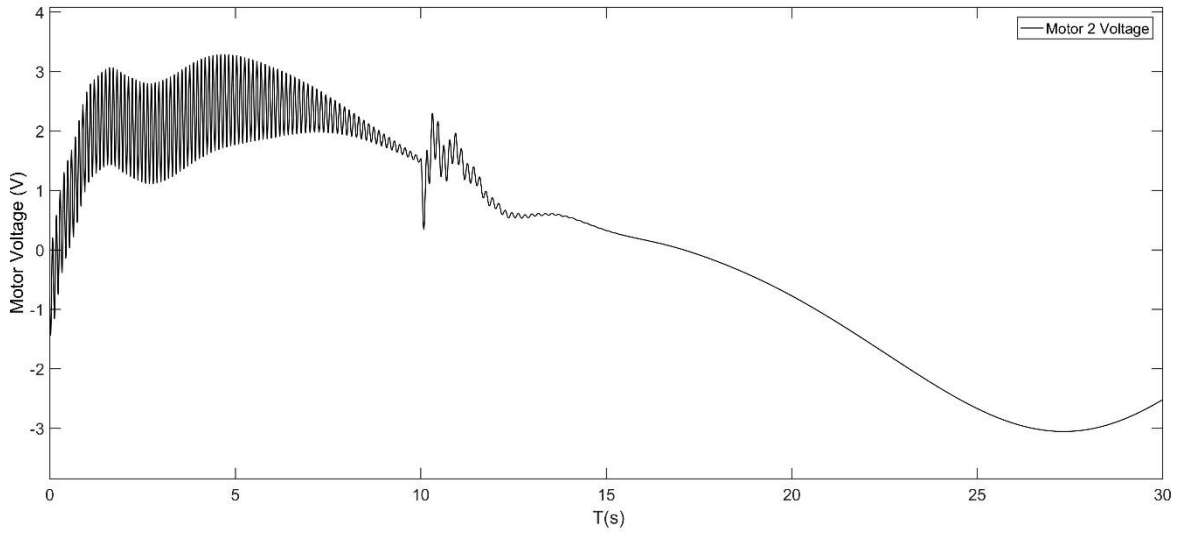
شکل ۴-۱۳ ولتاژ موتور اول با حضور اغتشاش خارجی



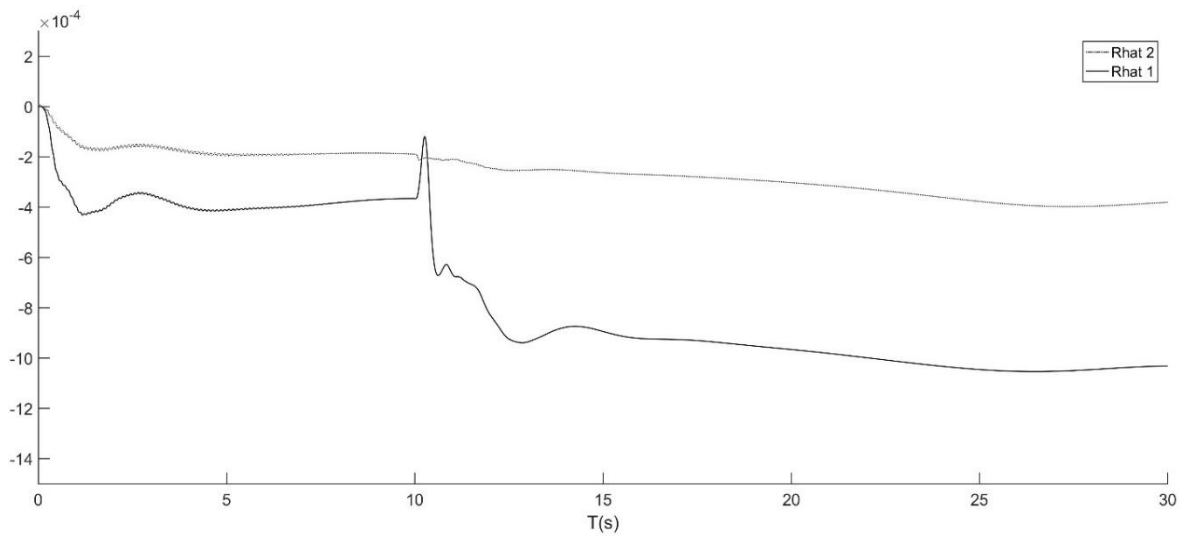
شکل ۴-۱۴ ردیابی مفصل دوم همراه با مسیر مطلوب با حضور اغتشاش خارجی



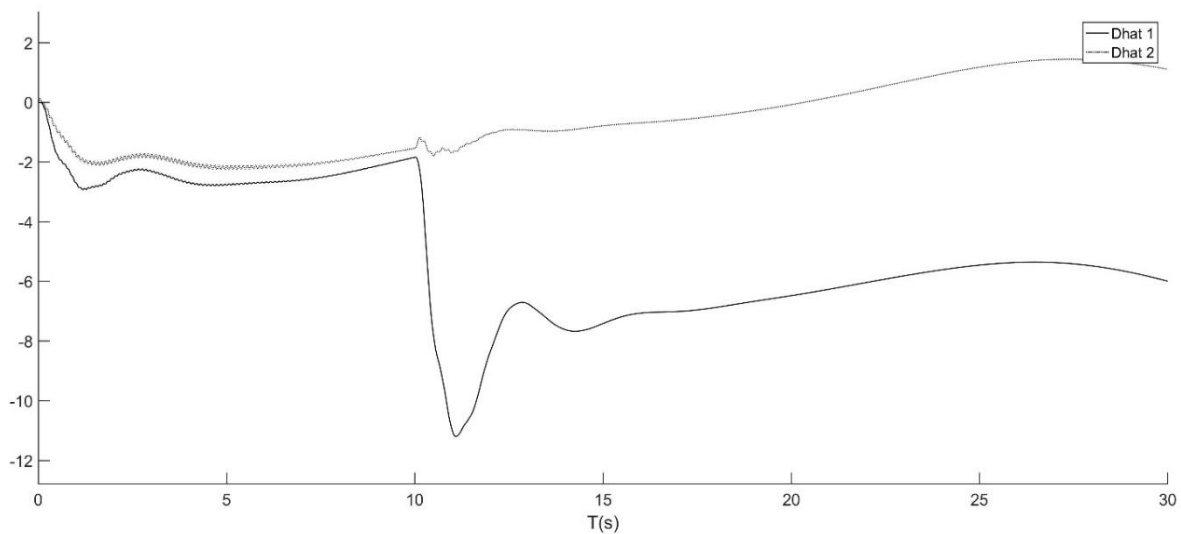
شکل ۴-۱۵ خطای ردگیری مفصل دوم با حضور اغتشاش خارجی



شکل ۴-۱۶ ولتاژ موتور دوم با حضور اغتشاش خارجی



شکل ۴-۱۷ پارامترهای تطبیق  $\hat{R}$  با حضور اغتشاش خارجی

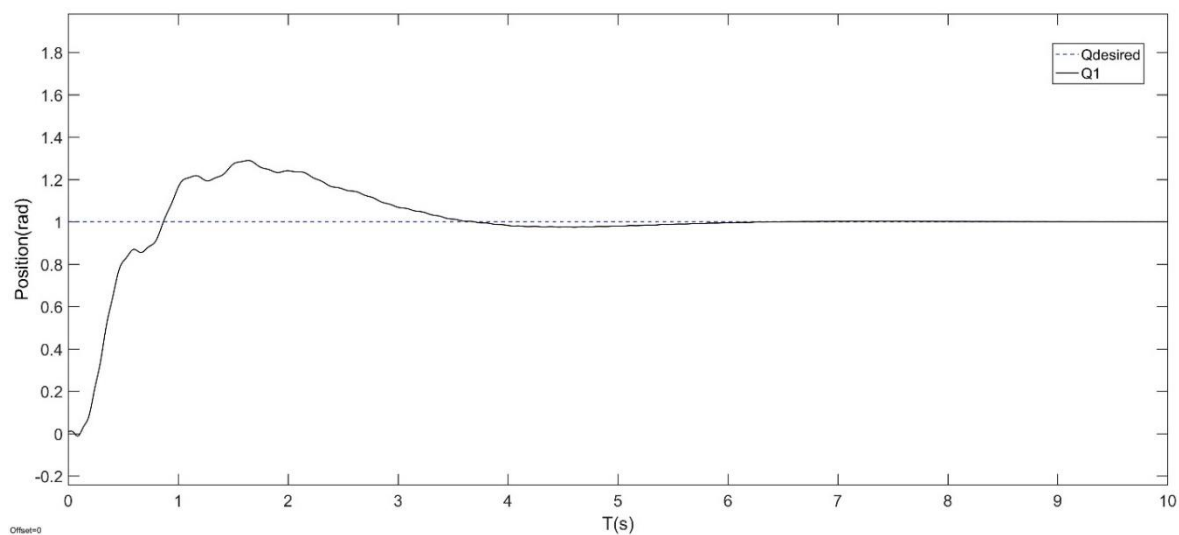


شکل ۴-۱۸ پارامترهای تطبیق  $\hat{d}$  با حضور اغتشاش خارجی

همانطور که مشاهده شده است، سیستم در برابر اغتشاش وارده، عملکرد کنترلی مناسبی داشته، به خوبی آن را کنترل و مسیر مطلوب را ردگیری نموده است.

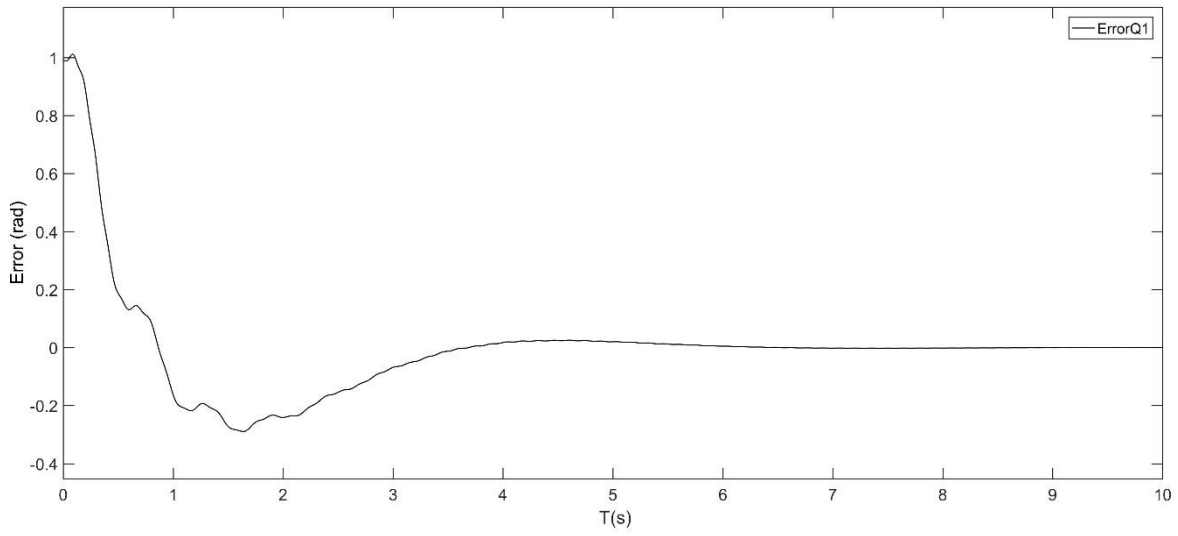
## ۴-۴-۲ تنظیم

جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل، برای تنظیم موقعیت مطلوب مفاصل بر روی ۱ رادیان تنظیم شده است. عملکرد سیستم کنترل، به صورت زیر است.

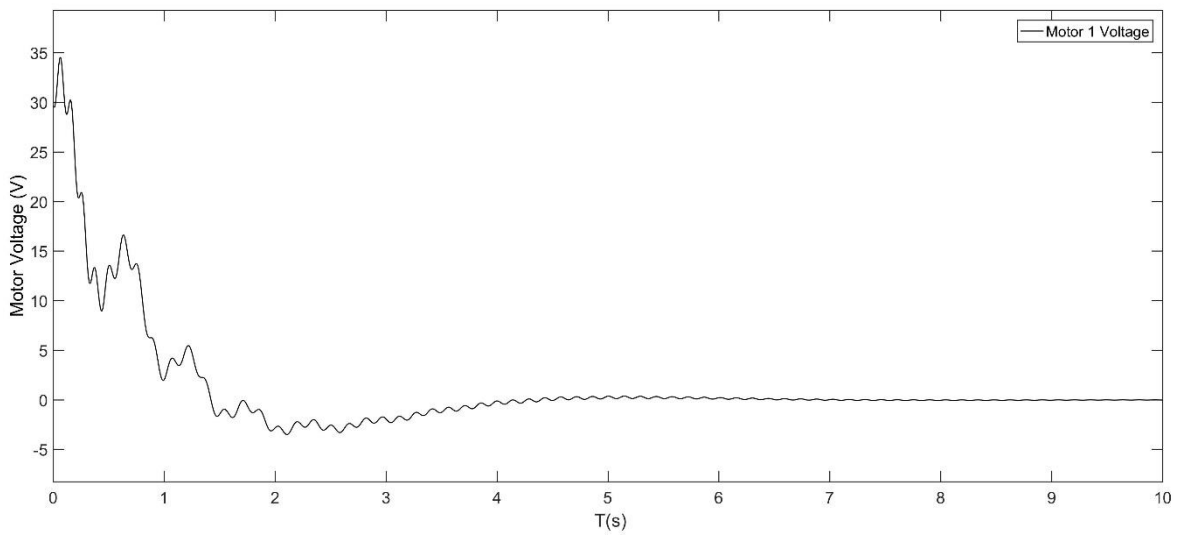


شکل ۴-۱۹ تنظیم مفصل اول

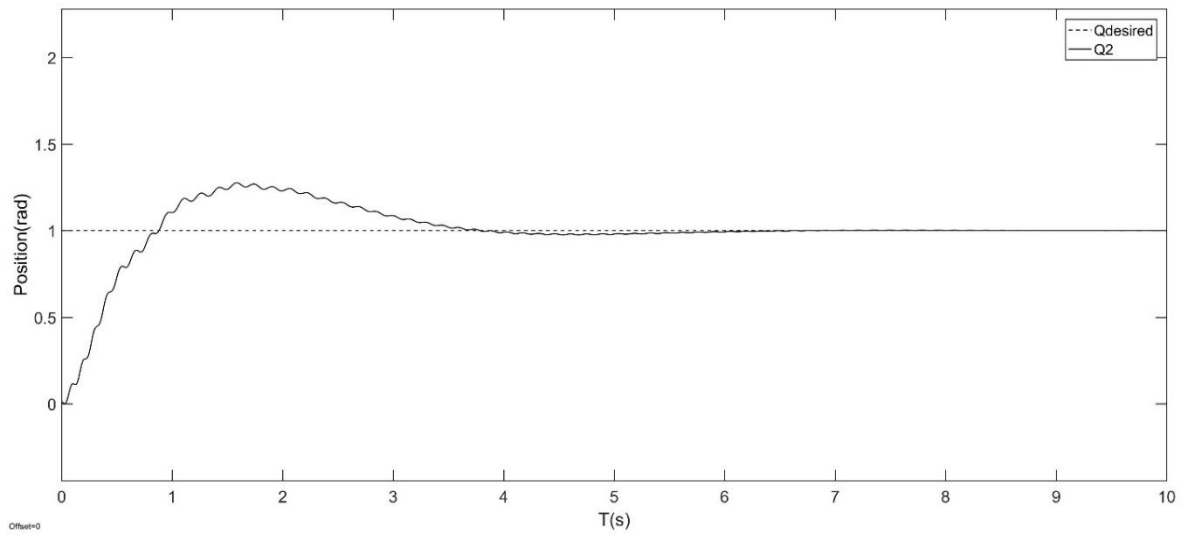




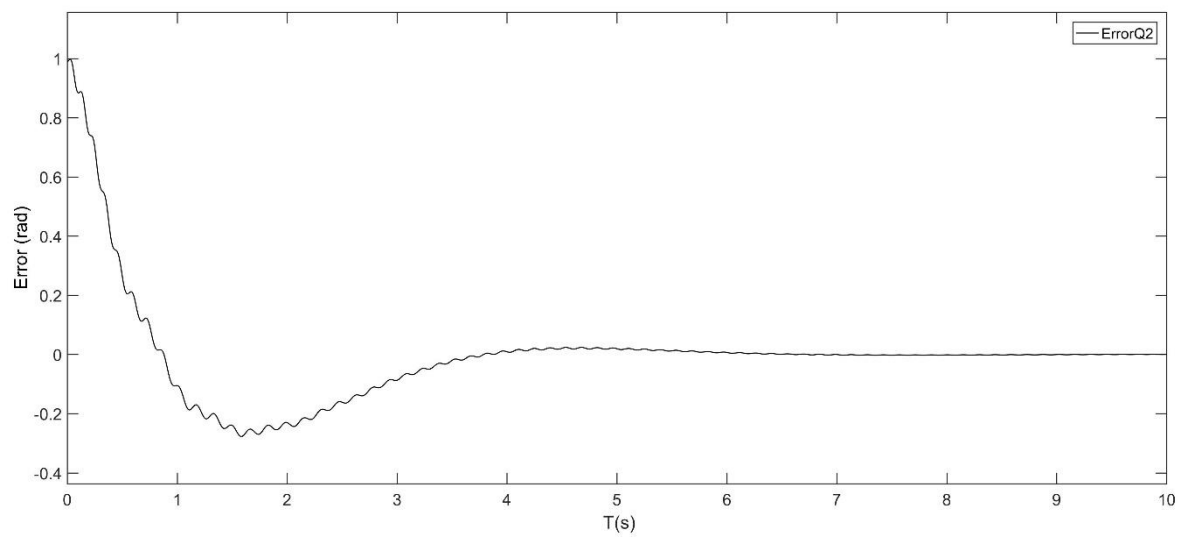
شکل ۲۰-۴ خطای تنظیم مفصل اول



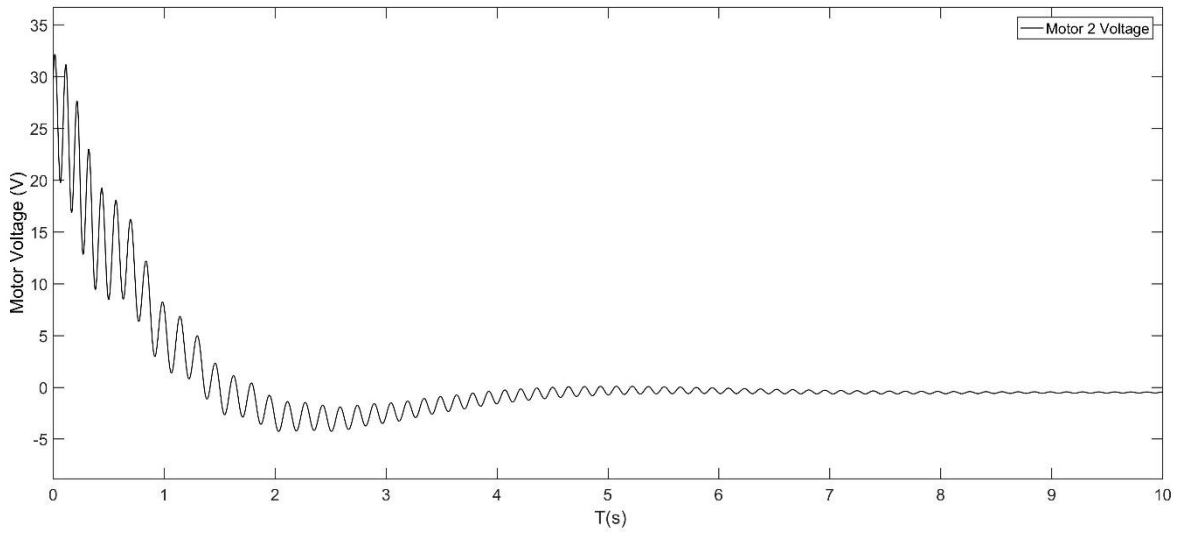
شکل ۲۱-۴ ولتاژ موتور اول



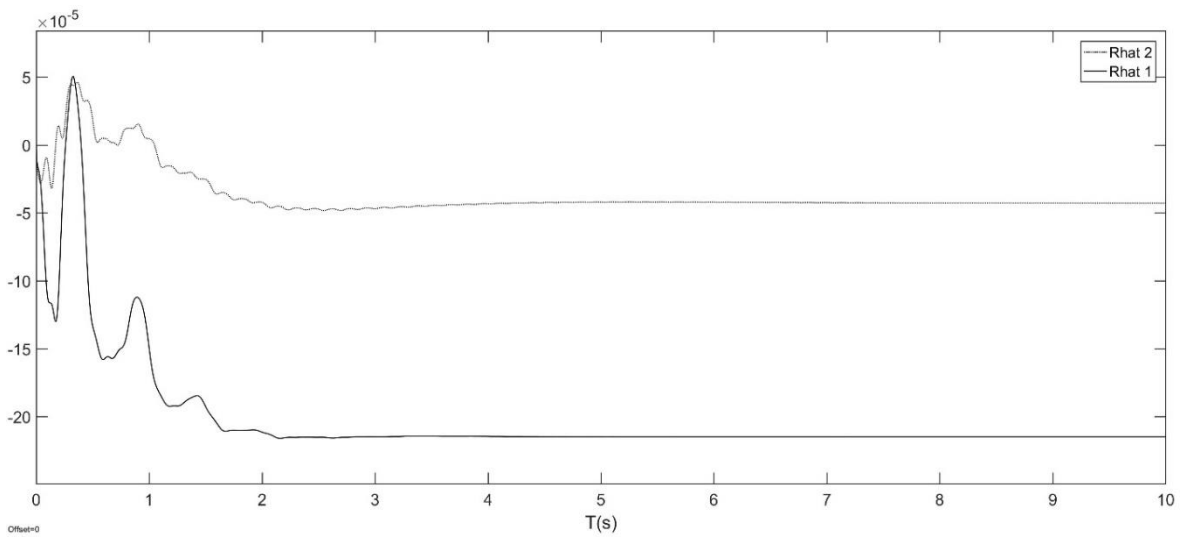
شکل ۲۲-۴ تنظیم مفصل دوم



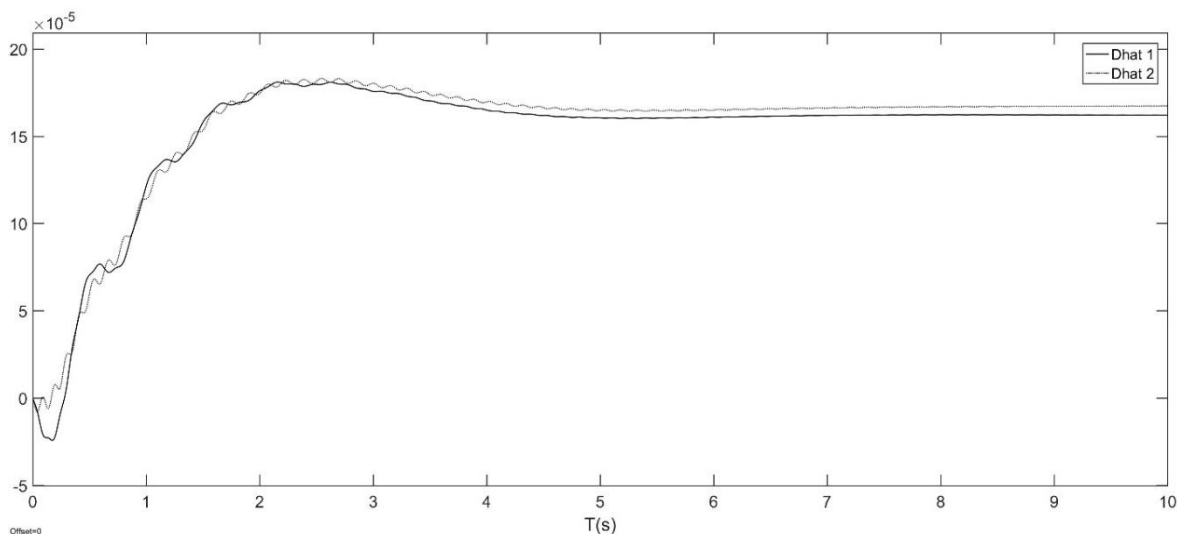
شکل ۲۳-۴ خطای تنظیم مفصل دوم



شکل ۴-۲۴ ولتاژ موتور دوم



شکل ۴-۲۵ پارامترهای تطبیق  $\hat{R}$



شکل ۴-۲۶ پارامترهای تطبیق  $\hat{d}$

شکل (۴-۱۹) و (۴-۲۲) عملکرد سیستم کنترل تطبیقی را برای حالت تنظیم نشان می‌دهند. خطای تنظیم مفصل اول و مفصل دوم به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۳) نشان داده شده است که همانطور مشاهده می‌شود، خطای تنظیم، پس از زمان کوتاهی صفر می‌شود و تنظیم به خوبی انجام داده شده است. سیگنال ورودی کنترل (ولتاژ موتورها) همانطور که در شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۴) مشاهده می‌شود، در ابتدا به علت وجود خطای اولیه در مفاصل ربات، بزرگ است. همچنین ولتاژ موتور بازوی دوم به علت غلبه بر نیروی گرانش دارای مقدار ماندگار ثابت بوده ولی ولتاژ موتور اول بعد از مدتی صفر می‌شود. در شکل‌های (۴-۲۵) و (۴-۲۶) فرایند تطبیق پارمترها نمایش داده شده است که همگی به مقدار ثابت همگرا شده است.

## ۴-۵ نتیجه گیری

کنترل تطبیقی با استفاده از کنترل ولتاژ به منظور کنترل بازوهای رباتیک انعطاف پذیر، در این فصل ارائه شد. روش پیشنهادی ارائه شده بر روی ربات دومفصلی اعمال شده و نتایج شبیه سازی برای کنترل ردگیری و تنظیم مفاصل آن ارائه گردیده که عملکرد مطلوب این سیستم کنترل را نشان می دهد. روش ارائه شده به مدل سیستم رباتیک وابسته نبوده و بطور مستقیم موقعیت مفاصل ربات را کنترل می کند. از مزایای روش پیشنهادی می توان به ساده بودن قانون کنترل و استفاده از موقعیت و سرعت مفاصل و جریان موتور به عنوان ورودی کنترل کننده و عدم استفاده از شتاب مفاصل، برای کنترل بازوی رباتیک انعطاف پذیر، نام برد.



# فصل پنجم

## نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر با دو مفصل به همراه موتورهای الکتریکی مغناطیس دائم جریان مستقیم، مورد بررسی قرار گرفته و کنترل تطبیقی آن مورد توجه و بررسی قرار گرفته است، تا بتوان به هدف اصلی پایان‌نامه یعنی کنترل تطبیقی بازوهای رباتیک با مفاصل انعطاف‌پذیر با راهبرد کنترل ولتاژ به خوبی دست یافت. قانون کنترل پیشنهاد شده، تنها با کمک پسخوردهایی از موقعیت و سرعت مفصل و همچنین جریان موتور، قابل پیاده‌سازی است.

روش کنترلی مذکور طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی شده و عملکرد سیستم کنترل برای حالت‌های کنترل ردگیری با حضور و عدم حضور اغتشاش خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. یکی از مزیت‌های روش‌های کنترل ولتاژ این است که این روش، مستقل از مدل ربات بوده و به صورت مستقل به هر مفصل سیستم اعمال گردیده است در نتیجه کنترل چند متغیره ربات به کنترل جداگانه هر مفصل تبدیل شده است که علاوه بر سادگی، سهم زیادی در کاهش حجم محاسبات دارد. ضعف روش‌های مبتنی بر کنترل گشتاور این است که دینامیک محرکه‌ها را در نظر نمی‌گیرند ولی در مقابل روش‌های مبتنی بر استراتژی کنترل ولتاژ به نقش موتورها توجه اساسی دارند. روش‌های مبتنی بر کنترل ولتاژ دارای عملکرد مناسب تری در ردگیری و تنظیم هستند.

از آنجا که در راهبرد کنترل ولتاژ نیازی به مدل پیچیده ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر نیست می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کنترل کننده تطبیقی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ نسبت به کنترل کننده تطبیقی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور، ترجیح داده می‌شود.



## ۲-۵ پیشنهادات

برای ادامه تحقیق پژوهش، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

با توجه به گسترش ربات‌های سیار، بررسی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی برای این دسته از ربات‌ها می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بررسی عملکرد سیستم کنترلی مذکور برای ربات‌های توان بخش نیز می‌تواند مورد توجه باشد.

تلاش برای حذف پسخورد سرعت مفاصل، در قانون کنترل و تنها استفاده از پسخورد موقعیت مفاصل با بازسازی قانون کنترل می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

و از آنجایی که کنترل ربات در فضای کار مورد توجه قرار گرفته است می‌توان روش مذکور را در فضای کار نیز پیاده سازی کرد.



# مراجع

- [1] L. -C Lin and K. Yuan, "Control of flexible joint robots via external linearization approach," *J. Robot. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–22, 1990.
- [2] G. a. Wilson and G. W. Irwin, "Tracking control of manipulators with elastic joints," *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, 1993.
- [3] C. Engineering, "Global adaptive partial state feedback tracking control of rigid-link flexible-joint robots\* W.E. Dixon, E. Zergeroglu, D.M. Dawson and M.W. Hannan," vol. 18, pp. 325–336, 2000.
- [4] L. M. Sweet and M. C. Good, "Re-definition of the robot control problem," *IEEE Control Syst. Mag.*, pp. 18–25, 1985.
- [5] F. L. Lewis, C. T. (Chaouki T. . Abdallah, D. M. Dawson, and F. L. Lewis, *Robot manipulator control : theory and practice*. Marcel Dekker, 2004.
- [6] P. Gierlak and M. Szuster, "Adaptive position/force control for robot manipulator in contact with a flexible environment," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 95, pp. 80–101, 2017.
- [7] M. W. Spong and M. (Mathukumalli) Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. Wiley, 1989.
- [8] M. M. Fateh, "On the Voltage-Based Control of Robot Manipulators," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 6, no. 5, pp. 702–712, 2008.
- [9] R. J. (Robert J. Schilling, *Fundamentals of robotics : analysis and control*. Prentice Hall, 1990.
- [10] M. M. Fateh, "Robust Control of Electrical Manipulators by Reducing the Effects of Uncertainties," vol. 7, pp. 161–167, 2009.
- [11] I. Cervantes and J. Alvarez-Ramirez, "On the PID tracking control of robot manipulators," *Syst. Control Lett.*, vol. 42, no. 1, pp. 37–46, 2001.

- [12] R. Kelly, “A Tuning Procedure for Stable PID Control of Robot Manipulators,” *Robotica*, vol. 13, no. 2, pp. 141–148, 1995.
- [13] C. Cheah and S. Kawamura, “PID control of robotic manipulator with uncertain Jacobian matrix,” ... *Autom. 1999. ...*, no. May, pp. 494–499, 1999.
- [14] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- [15] Y. Shen, W. J. Cai, and S. Li, “Multivariable process control: Decentralized, decoupling, or sparse?,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 2, pp. 761–771, 2010.
- [16] N. S. Bedrossian and M. W. Spong, “Feedback linearization of robot manipulators and riemannian curvature,” *J. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 8, pp. 541–552, 1995.
- [17] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, “Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 70, no. 2, pp. 1445–1458, 2012.
- [18] R. H. Middleton and G. C. Goodwin, “Adaptive computed torque control for rigid link manipulations,” *Syst. Control Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 9–16, 1988.
- [19] M. A. Llama, R. Kelly, and V. Santibañez, “Stable computed-torque control of robot manipulators via fuzzy self-tuning,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B Cybern.*, vol. 30, no. 1, pp. 143–150, 2000.
- [20] Homayoun Seraji, “Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation and Experimentation,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 2, pp. 183–201, 1989.
- [21] S. H. Hsu and L. C. Fu, “A fully adaptive decentralized control of robot manipulators,” *Automatica*, vol. 42, no. 10, pp. 1761–1767, 2006.
- [22] Z. Qu and D. M. Dawson, *Robust tracking control of robot manipulators*. IEEE Press, 1996.
- [23] C. Abdallah, D. M. Dawson, P. Dorato, and M. Jamshidi, “Survey of robust control for rigid robots,” *IEEE Control Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 24–30, Feb. 1991.

- [24] M. M. Fateh, "Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model," *Nonlinear Dyn.*, vol. 61, no. 4, pp. 655–666, 2010.
- [25] M. Mehdi Fateh, *Robust voltage control of electrical manipulators in task-space*, vol. 6. 2010.
- [26] M. M. Fateh, "Nonlinear control of electrical flexible-joint robots," *Nonlinear Dyn.*, vol. 67, no. 4, pp. 2549–2559, 2012.
- [27] D. Zhang and B. Wei, "A review on model reference adaptive control of robotic manipulators," *Annu. Rev. Control*, vol. 43, pp. 188–198, 2017.
- [28] J.-J. E. (Jean-J. E. . Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, 1991.
- [29] R. Gholipour and M. M. Fateh, "Adaptive task-space control of robot manipulators using the Fourier series expansion without task-space velocity measurements," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 123, pp. 285–292, 2018.
- [30] R. Yang, C. Yang, M. Chen, and A. S. Annamalai, "Discrete-time optimal adaptive RBFNN control for robot manipulators with uncertain dynamics," *Neurocomputing*, vol. 234, pp. 107–115, 2017.
- [31] J. Park and I. W. Sandberg, "Universal Approximation Using Radial-Basis-Function Networks," *Neural Comput.*, vol. 3, no. 2, pp. 246–257, 1991.
- [32] M. M. Fateh, S. Khorashadizadeh, and S. Ahmadi, *Adaptive RBF network control for robot manipulators*, vol. 2. 2014.
- [33] C. F. Baicu, C. D. Rahn, and D. M. Dawson, "Backstepping Boundary Control of Flexible-Link Electrically Driven Gantry Robots," vol. 3, no. 1, pp. 60–66, 1998.
- [34] R. Fierro and F. L. Lewis, "CONTROL OF A NONHOLONOMIC MOBILE ROBOT : BACKSTEPPING KINEMATICS INTO DYNAMICS," no. December, pp. 3805–3810, 1995.

- [35] C. M. M. Lim and T. Hiyama, "Application of fuzzy logic control to a manipulator," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 5, pp. 688–691, 1991.
- [36] K. K. Kumbla and M. Jamshidi, "Control of robotic manipulator using fuzzy logic," *Proc. 1994 IEEE 3rd Int. Fuzzy Syst. Conf.*, pp. 518–523, 1994.
- [37] L.-X. Wang, "A COURSE IN ' FUZZY A Course in Fuzzy Systems and Control," 1997.
- [38] C. Tsai, C. Wang, and W. Lin, "Robust fuzzy model-following control of robot manipulators," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 462–469, 2000.
- [39] M. M. Fateh, "Robust Fuzzy Control of Electrical Manipulators," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 60, no. 3–4, pp. 415–434, 2010.
- [40] M. M. Fateh and S. Fateh, "A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 10, no. 1, pp. 64–72, 2013.
- [41] B. Brogliato, R. Ortega, and R. Lozano, "Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study," *Automatica*, vol. 31, no. 7, pp. 941–956, 1995.
- [42] M. C. Chien and A. C. Huang, "Adaptive control for flexible-joint electrically driven robot with time-varying uncertainties," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1032–1038, 2007.
- [43] Y. Li, S. Tong, and T. Li, "Fuzzy adaptive dynamic surface control for a single-link flexible-joint robot," *Nonlinear Dyn.*, vol. 70, no. 3, pp. 2035–2048, 2012.
- [44] Sung Jin Yoo, Jin Bae Park, and Yoon Ho Choi, "Adaptive Output Feedback Control of Flexible-Joint Robots Using Neural Networks: Dynamic Surface Design Approach," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 19, no. 10, pp. 1712–1726, 2008.
- [45] Y.-C. Chang and H.-M. Yen, "Robust tracking control for a class of electrically driven flexible-joint robots without velocity measurements," *Int. J. Control*, vol. 85, no. 2, pp. 194–212, 2012.

- [46] S. E. Talole and S. B. Phadke, “Model Following Sliding Mode Control Based on Uncertainty and Disturbance Estimator,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 130, no. 3, p. 034501, 2008.
- [47] J. Carvajal, G. Chen, and H. Ogmen, “Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 123, no. 3, pp. 249–270, 2000.
- [48] J. S. Bang, H. Shim, S. K. Park, and J. H. Seo, “Robust tracking and vibration suppression for a two-inertia system by combining backstepping approach with disturbance observer,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3197–3206, 2010.
- [49] V. Santibañez, A. Member, R. Kelly, and M. A. Llama, “A Novel Global Asymptotic Stable Set-Point Fuzzy Controller With Bounded Torques for Robot Manipulators,” vol. 13, no. 3, pp. 362–372, 2005.
- [50] E. M. Jafarov and Y. Istefanopulos, “A New Variable Structure PID-Controller Design for Robot Manipulators,” vol. 13, no. 1, pp. 122–130, 2005.
- [51] B. Chen, S. Member, H. Uang, and C. Tseng, “Robust Tracking Enhancement of Robot Systems Including Motor Dynamics: A Fuzzy-Based Dynamic Game Approach,” vol. 6, no. 4, pp. 538–552, 1998.
- [52] M. M. Fateh, “Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 67, no. 2, pp. 1525–1537, 2012.
- [53] M. M. Fateh and R. Babaghasabha, “Impedance control of robots using voltage control strategy,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 74, no. 1–2, pp. 277–286, 2013.
- [54] K. Khorasani, “A neural-network-based controller for a single-link flexible manipulator using the inverse dynamics approach,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 6, pp. 1074–1086, 2001.
- [55] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, “Robot modeling and control,” *IEEE Control Syst.*, vol. 26, no. 6, pp. 113–115, 2006.

- [56] F. Lin and S. Chen, “Intelligent Sliding-Mode Position Control Using Recurrent Wavelet Fuzzy Neural Network for Electrical Power Steering System,” *Int. J. Fuzzy Syst.*, 2017.
- [57] F. Lin, S. Member, L. Teng, and C. Chang, “Adaptive Backstepping Control for Linear Induction Motor Drive Using FPGA,” pp. 1269–1274. 2006.
- [58] A. J. Koshkouei and K. J. Burnham, “Adaptive backstepping sliding mode control for feedforward uncertain systems,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 42, no. 12, pp. 1935–1946, Dec. 2011.
- [59] Y.-C. Chang, “Robust adaptive neural tracking control for a class of electrically driven robots with time delays,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 45, no. 11, pp. 2418–2434, 2014.
- [60] H. Chaoui, W. Gueaieb, M. Biglarbegian, and M. Yagoub, “Computationally Efficient Adaptive Type-2 Fuzzy Control of Flexible-Joint Manipulators,” *Robotics*, vol. 2, no. 2, pp. 66–91, 2013.

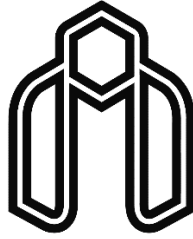


## **Abstract**

In this thesis, an adaptive controller for the robot manipulator with flexible-joints is designed to achieve tracking and set point position control. The proposed control rule is based on the voltage control strategy independent of the robot's dynamic model and each joint is controlled individually. This control approach is robust against the uncertainties of the robot model. The proposed adaptive control approach will be implemented for the first time on the flexible-joints robotic arms using voltage control strategy. The stability of the control system is analyzed and guaranteed. Simulation results show the effective performance of the control approach.

Keywords: Robot with flexible joints, Adaptive control, Voltage control strategy, Model uncertainty





Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

*Adaptive Control Of Flexible-joint Robot Manipulators Using Voltage  
Control Strategy*

**Ali Asghar Rezaei**

Supervisor:

**Dr. Mohammad Mahdi Fateh**

**August 2018**