بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

پایداری و کنترل روبات دوپا با کف پای منحنی شکل با استفاده از مفهوم نقطه گشتاور صفر

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

گردآورنده:

معصومه صفرتوبی

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی دردل- دکتر محمد حسن قاسمی

استاد مشاور:

دکتر حمیدرضا محمدی دانیالی

بهمن‌ماه ۱۳۹۲

به نام خدا

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

رساله کارشناسی ارشد با عنوان «پایداری و کنترل روبات دوپا با کف پای منحنی شکل با استفاده از مفهوم نقطه گشتاور صفر» نگارش سرکار خانم «معصومه صفرتوبی» از نظر فرم و محتوی بررسی و پذیرش آن برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید شده‌است.

اعضای هیئت داوران	**نام و نام خانوادگی**	**رتبه علمی**	**امضاء**
۱- اساتید راهنما	دکتر مرتضی دردل، دکتر محمد حسن قاسمی	استادیار	
۲- استاد مشاور	دکتر حمیدرضا محمدی دانیالی	دانشیار	
۳- استاد ممتحن	دکتر محمد هادی پاشایی	دانشیار	
٤- استاد ممتحن	دکتر علیرضا فتحی	استادیار	

تاریخ

۸ بهمن‌ماه ۱۳۹۲

حق چاپ، 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 مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مجاز می‌باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقـدیم به:

پدر و مادر عزیزم

که وام دار دعای خیرشان هستم.

همسر مهربانم

که بار خستگی هایم را به دوش کشیده است.

اساتید گران قدرم

که دانسته هایم را از ایشان به امانت گرفته ام.

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خداوند متعال را که به انسان حکمت و دانش آموخت تا خود را بشناسد آنگاه خدای خود را. خدای را سپاس می‌گویم که در دوران تحصیل خود از نعمت اخلاق، تجربه و دانش استاد ارجمند جناب آقای دکتر مرتضی دردل بهره‌های فراوان بردم. نقطه‌نظرات جامع و کلیدی ایشان در جای جای این تحقیق، نحوه فکر کردن و رویارویی صبورانه با مسائل علمی را به من آموخت. از خداوند منان آرزوی موفقیت در تمامی مراحل زندگی برای ایشان خواستارم. همچنین از جناب آقای دکتر حمیدرضا محمدی دانیالی و جناب آقای دکتر محمد حسن قاسمی کمال تشکر و قدردانی را دارم و از خداوند متعال آرزوی توفیق روزافزون ایشان را خواستارم. در پایان از تمام عزیزانی که با همفکری و مساعدت خود باعث پیشرفت مراحل پایان‌نامه‌ی اینجانب شدند، تشکر و قدردانی می‌نمایم و از درگاه باری‌تعالی برای همگان سلامتی و موفقیت مسئلت دارم.

چکیده

مهم‌ترین مساله در استفاده از ربات‌های راه‌رونده، تلاش برای حفظ تعادل و جلوگیری از افتادن آن‌ها است. برخلاف سایر ربات‌های دوپای متداول که از مفاصل محرک استفاده می‌کنند، راه‌رونده‌های غیرفعال بدون اعمال هر گونه تحریک خارجی و یا ورودی کنترلی بر روی یک شیب کوچک راه می‌روند. این راه‌رونده‌ها به شرایط اولیه بسیار حساس هستند. از این‌رو، انتخاب شرایط اولیه مناسب به قدری مهم است که می‌تواند موجب پایداری یا ناپایداری ربات گردد. از سوی دیگر، با افزایش شیب و ایجاد انشقاق‌های حرکتی در سرعت‌های بالا، گام‌های ربات به سمت آشوبی شدن و ناپایداری پیش می‌رود. در راستای رفع این محدودیت‌ها، تعیین شرایط اولیه مناسب برای سیکل حدی مرتبه اول گام پایدار و حتی ناپایدار و هم‌چنین کنترل ناپایداری بر شیب‌های تند اهداف این پایان‌نامه را تشکیل می‌دهد. راه‌رونده‌های غیرفعال مورد بررسی با دو شکل کف پای سوزنی و منحنی انتخاب شده‌اند. دو روش به ترتیب برمبنای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی در قالب یک مساله مقدار مرزی و تعیین تابع گام ربات به شیوه گسسته‌سازی با روش تفاضل محدود برای تعیین شرایط اولیه مناسب و دستیابی به سیکل‌های گام مرتبه اول پیشنهاد شده‌است. پس از یافتن سیکل‌های حدی به کمک شرایط اولیه حاصل از این دو روش، دو دیدگاه متداول پایداری سیکلی و تعادل براساس مفهوم نقطه گشتاور صفر در بررسی پایداری چرخه‌های گام مورد استفاده قرار گرفته‌است. با محاسبه موقعیت نقطه گشتاور صفر ربات‌های موردنظر مشخص گردید که معیار مربوطه در تحلیل پایداری راه‌رونده‌های غیرفعال کارایی ندارد. در نتیجه، شیوه‌های کنترلی دیگری براساس پایداری سیکلی به نام‌های روش گشتاور محاسبه شده، کنترل فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای جهت پایدارسازی گام‌های ناپایدار در شیب‌های تند سطح معرفی شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش کنترل فیدبک حالت لحظه‌ای توانسته با صرف کم‌ترین میزان انرژی به کنترل گام‌های ناپایدار در لحظه برخورد پا با سطح بپردازد.

کلمات کلیدی: *راه‌رونده غیرفعال، شرایط اولیه، سیکل حدی، پایداری، کنترل*

فهرست مطالب

صفحه تصویب‌نامه ..... الف

گواهی صحت و اصالت پایان نامه و مجوز بهره برداری ..... ب

فصل اول: مقدمه و پیشـــینه تحقیقاتی ۱

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۱-۱-بیان مساله ۲

۱-۱-۲-مفاهیم اولیه در حرکت ربات‌های دوپا ۵

۱-۲-نظریه‌های پیشنهادی پیرامون پایداری و کنترل راه رفتن ربات دوپا ۸

۱-۲-۱-الگوهای پیشنهادی برای بررسی و کنترل راه رفتن ربات دوپا ۹

۱-۲-۲-مرور تاریخی معیار نقطه گشتاور صفر ۱۲

۱-۲-۳-مرور تاریخی الگوی راه رفتن سیکلی براساس مفهوم دینامیک غیرفعال ۱۵

۱-۳-اهداف و مسایل مورد بررسی پایان‌نامه ۲۰

۱-۳-۱-اهداف پایان‌نامه ۲۱

۱-۳-۲-مرور اجمالی بر مباحث ارایه شده ۲۱

فصل دوم: تحلیل راه رفتن ســیکلی ۲۲

۲-۱-مقدمه ۲۳

۲-۲-مدل‌سازی ۲۳

۲-۲-۱-معادلات دینامیکی حرکت ۲۵

۲-۲-۱-۱-معادلات حرکت راه‌رونده با کف پای سوزنی ۲۵

۲-۲-۱-۲-معادلات حرکت راه‌رونده با کف پای منحنی ۲۶
۲-۲-۱-۳-معادلات حرکت راه‌رونده با کف پای مسطح ۲۷
۲-۲-۲-روابط برخورد ۳۰
۲-۲-۲-۱-برخورد در راه‌رونده با کف پای سوزنی ۳۱
۲-۲-۲-۲-برخورد در راه‌رونده با کف پای منحنی ۳۲
۲-۲-۲-۳-برخورد در راه‌رونده با کف پای مسطح ۳۳
۲-۳-سیکل‌های حدی راه رفتن ۳۵
۲-۳-۱-تعیین شرایط اولیه با حل معادلات مقدار مرزی ۳۷
۲-۳-۲-تعیین شرایط اولیه به روش تفاضل محدود ۴۰
۲-۳-۳-تعیین سیکل حدی مرتبه اول گام ۴۴
۲-۴-بررسی پایداری ۴۵
۲-۴-۱-پایداری سیکل حدی ۴۵
۲-۴-۲-پایداری براساس معیار نقطه گشتاور صفر ۴۸
۲-۵-کنترل راه رفتن مدل‌های راه‌رونده غیرفعال ۵۶
۲-۵-۱-کنترل به روش گشتاور محاسبه شده ۵۷
۲-۵-۲-کنترل فیدبک حالت پیوسته در کل مسیر حرکت ۵۸
۲-۵-۳-کنترل فیدبک حالت لحظه‌ای ۶۰
۲-۶-جمع‌بندی مباحث فصل دوم ۶۱
فصل سوم: شبـــیه‌سازی و نتـــایج ۶۳
۳-۱-مقدمه ۶۴

۳-۲-نتایج حاصل برای سیکل‌های حدی راه رفتن و تحلیل پایداری ٦٤
۳-۲-۱-مدل راه‌رونده غیرفعال با کف پای سوزنی ٦٤
۳-۲-۲-مدل راه‌رونده غیرفعال با کف پای منحنی..... ۹٤
۳-۲-۳-مدل راه‌رونده غیرفعال با کف پای مسطح ۱۱۱
۳-۳-مطالعه عملکرد روش‌های کنترلی و ارزیابی آن‌ها..... ۱۱۷
۳-۳-۱-نتایج حاصل از اعمال روش کنترل گشتاور محاسبه شده ۱۱۸
۳-۳-۲-نتایج حاصل از کنترل فیدبک حالت ۱۲۱
۳-۴-جمع‌بندی مباحث فصل سوم..... ۱۲۸
فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۳۰
۴-۱-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۳۱
۴-۲-پیشنهادات برای کارهای آینده ۱۳۳
منابع ۱۳۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: وضعیت آناتومی و صفحات حرکتی بدن انسان در فضای سه‌بعدی [۹]. ۶

شکل ۱-۲: حرکت مرکز جرم در (الف) راه رفتن استاتیکی، (ب) راه رفتن دینامیکی. ۷

شکل ۱-۳: حالت‌های مختلف یک گام متناوب در راه رفتن یک ربات دوپا. ۸

شکل ۱-۴: (الف) ربات انسان‌نمای آسیمو [۴۳]، (ب) سایر ربات‌های دوپای کنترل شده براساس مفهوم نقطه گشتاور صفر [۴۴-۴۵]. ۱۳

شکل ۱-۵: مدل ربات انسان‌نمای کنترل شده توسط سوگی‌هارا [۵۶-۵۸]. ۱۴

شکل ۱-۶: ربات چهارچرخ مورد بررسی توسط کیم و همکاران در [۶۲]. ۱۵

شکل ۱-۷: مدل تکاملی راه‌رونده غیرفعال دینامیکی مک‌گیر [۶۳]. ۱۶

شکل ۱-۸: مدل ارایه شده توسط (الف) گارسیا و همکاران [۶۶]، (ب) گوزوامی و همکاران [۷۰]. ۱۷

شکل ۱-۹: ساختار ربات تحلیل شده در [۸۲]. ۱۸

شکل ۱-۱۰: شکل‌های متفاوت کف پا برای مدل راه‌رونده زانویی در [۸۴]. ۱۹

شکل ۲-۱: مدل راه‌رونده دوپای غیرفعال با کف پاهای (الف) سوزنی، (ب) منحنی، (ج) مسطح. ۲۳

شکل ۲-۲: مدل راه‌رونده دوپای غیرفعال با کف پای مسطح (الف) نوسان اول، (ب) برخورد اول، (ج) نوسان دوم، (د) برخورد دوم. ۲۸

شکل ۲-۳: : برخورد پای نوسانی با سطح و تعویض پاها در مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی. ۳۱

شکل ۲-۴: ساختار الگوی پیشنهادی براساس حل معادلات مقدار مرزی برای تعیین شرایط اولیه مناسب. ۳۹

شکل ۲-۵: گسسته‌سازی پاسخ معادلات دینامیکی راه‌رونده غیرفعال. ۴۱

شکل ۲-۶: روند تشکیل ماتریس ژاکوبین و تعیین مقادیر ویژه آن برای سیکل حدی مرتبه اول راه‌رونده غیرفعال. ۴۷

شکل ۲-۷: نیروهای اعمالی بر کف پای ربات درحالت تک تکیه‌گاهی [۱۵]. ۴۸

شکل ۲-۸: نقطه گشتاور صفر مجازی و گشتاور نامتعادل کننده حرکت ربات [۱۵]. ۴۹

شکل ۲-۹: مدل ارابه-میز برای مدل‌سازی دینامیکی ربات دوپا [۵۴]. ۵۰

شکل ۲-۱۰: نمایش نیروهای اینرسی در ساده‌ترین مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی..... ۵۲

شکل ۲-۱۱: تغییرات موقعیت نقطه گشتاور صفر در سیکل حدی مرتبه اول گام‌های کوتاه و بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی در شیب ۰/۰۰۹ رادیان..... ۵۳

شکل ۲-۱۲: موقعیت نقطه گشتاور صفر و ناحیه تکیه‌گاهی در سیکل حدی مرتبه اول گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای منحنی در شیب ۰/۰۰۹ رادیان..... ۵۴

شکل ۲-۱۳: موقعیت نقطه گشتاور صفر و ناحیه تکیه‌گاهی نوسان اول و دوم در سیکل حدی مرتبه اول گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای مسطح در شیب ۰/۰۰۹ رادیان..... ۵۵

شکل ۲-۱۴: نمای کلی از روش کنترل گشتاور محاسبه شده برای پایدارسازی سیکل گام مرتبه اول راه‌رونده غیرفعال.. ۵۸

شکل ۲-۱۵: نمای کلی از شیوه کنترل فیدبک حالت پیوسته در کل مسیر راه رفتن..... ۶۰

شکل ۲-۱۶: نمای کلی از شیوه کنترل فیدبک لحظه‌ای در انتهای سیکل گام..... ۶۱

شکل ۳-۱: ساده‌ترین مدل راه‌رونده دوپای غیرفعال با کف پاهای سوزنی [۶۶]..... ۶۵

شکل ۳-۲: حدس اولیه مناسب برای حل معادلات مقدار مرزی در سیکل مرتبه اول گام راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۶۵

شکل ۳-۳: پاسخ مرتبه اول معادلات مقدار مرزی به همراه شرایط اولیه مناسب برای مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۶۶

شکل ۳-۴: زاویه پاهای راه‌رونده با کف پای سوزنی در برابر زمان برای یک گام بلند سیکل حدی مرتبه اول [۶۶]..... ۶۷

شکل ۳-۵: پاسخ مرتبه اول بلند معادلات مقدار مرزی به همراه شرایط اولیه مناسب برای مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی در محدوده ۰/۰۰۹≤γ≤۰/۰۱۵ رادیان و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$..... ۶۸

شکل ۳-۶: تغییرات زاویه (الف) پای تکیه‌گاهی، (ب) پای نوسانی در برابر شیب برای گام‌های کوتاه و بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$..... ۷۰

شکل ۳-۷: نتایج کار گارسیا و همکارانش برای تغییرات زاویه پای تکیه‌گاهی راه‌رونده با کف پای سوزنی در شرایط اولیه گام‌های بلند و کوتاه مرتبه اول [۶۶]..... ۷۰

شکل ۳-۸: تغییرات سرعت زاویه‌ای (الف) پای تکیه‌گاهی، (ب) پای نوسانی در برابر شیب برای گام‌های کوتاه و بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , a = 0$ ۷۱

شکل ۳-۹: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009 \ (rad)$ ۷۲

شکل ۳-۱۰: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام کوتاه راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009 \ (rad)$ ۷۲

شکل ۳-۱۱: نمودار فضای فاز سیکل حدی مرتبه اول (الف) گام بلند (ب) گام کوتاه راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009 \ (rad)$ ۷۳

شکل ۳-۱۲: نمودار مکان هندسی سیکل حدی مرتبه اول گام (الف) بلند (ب) کوتاه برای مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009 \ (rad)$ ۷۴

شکل ۳-۱۳: (الف) سیکل‌های حدی مرتبه اول گام بلند و (ب) نمودار فضای فاز آن‌ها برای مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی در محدوده ۰/۰۰۹ ≤γ≤۰/۰۱۵ رادیان و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ ۷۵

شکل ۳-۱۴: نمودار مکان هندسی سیکل‌های حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی در محدوده شیب ۰/۰۰۹ ≤γ≤۰/۰۱۵ رادیان و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ ۷۶

شکل ۳-۱۵: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه دوم گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.016 \ (rad)$ ۷۷

شکل ۳-۱۶: نمودار انشقاق و نمایش پدیده دوشاخگی در سیکل‌های گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ ۷۸

شکل ۳-۱۷: نمودار انشقاق بدست آمده برای سیکل‌های مرتبه دوم گام بلند توسط گارسیا و همکاران [۶۶]..... ۷۸

شکل ۳-۱۸: نمودار مکان هندسی قطب‌ها برای یک گام بلند مرتبه اول مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0 , \gamma = 0.009 \ (rad)$ ۷۹

شکل ۳-۱۹: تغییرات زوایا و سرعت‌های زاویه‌ای آن‌ها در برابر شیب برای گام‌های کوتاه و بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02 , \bar{a} = 0$ ۸۱

شکل ۳-۲۰: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$ ۸۲

شکل ۳-۲۱: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام کوتاه راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$ ۸۲

شکل ۳-۲۲: نمودار فضای فاز سیکل حدی مرتبه اول (الف) گام بلند (ب) گام کوتاه راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$ ۸۴

شکل ۳-۲۳: نمودار مکان هندسی سیکل حدی مرتبه اول گام (الف) بلند (ب) کوتاه برای مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$ ۸۴

شکل ۳-۲۴: تغییر شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصه $\bar{a} = 0$ با توجه به تغییر نسبت جرمی از مقدار ۰ به ۰/۰۲ ..... ۸۵

شکل ۳-۲۵: نمودار مکان هندسی سیکل حدی مرتبه اول گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.012\ (rad)$ ۸۶

شکل ۳-۲۶: نمودار انشقاق و نمایش پدیده دوشاخگی در سیکل‌های گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0$ ۸۷

شکل ۳-۲۷: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه دوم گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.012\ (rad)$ ۸۸

شکل ۳-۲۸: (الف) نمودار مکان هندسی، (ب) تغییرات بزرگ‌ترین مقدار ویژه برای گام بلند مرتبه اول مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی در محدوده $۰ \leq \beta \leq ۰/۰۵$ و مشخصات $\gamma = 0.009\ rad\ , \bar{a} = 0$ ۸۸

شکل ۳-۲۹: نمودار (الف) زاویه (ب) سرعت‌های زاویه‌ای پاهای راه‌رونده در برابر زمان برای یک گام بلند سیکل حدی مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0.5\ , \gamma = 0.009\ (rad)$ ۹۰

شکل ۳-۳۰: تغییر دوره تناوب گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصه $\beta = 0.02$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها ۹۱

شکل ۳-۳۱: تغییر شرایط اولیه سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصه $\beta = 0.02$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها ۹۲

شکل ۳-۳۲: جابه‌جایی مقادیر ویژه در نمودار مکان هندسی یک گام بلند راه‌رونده با کف پای سوزنی بر شیب ۰/۰۰۹ رادیان برای (الف) $\beta = 0$ (ب) $\beta = 0.02$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها..... ۹۳

شکل ۳-۳۳: (الف) نمودار مکان هندسی، (ب) تغییرات بزرگ‌ترین مقدار ویژه راه‌رونده با کف پای سوزنی در محدوده ۰≤ $\bar{a}$≤۰/۶۴ و شرایط $\beta = 0,\ \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۳

شکل ۳-۳۴: حدس اولیه مناسب برای حل معادلات مقدار مرزی در سیکل مرتبه اول گام راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۵

شکل ۳-۳۵: پاسخ مرتبه اول معادلات مقدار مرزی به همراه شرایط اولیه مناسب برای مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۵

شکل ۳-۳۶: پاسخ مرتبه اول بلند معادلات مقدار مرزی به‌همراه شرایط اولیه مناسب برای مدل راه‌رونده با کف پای منحنی در محدوده ۰≤ $\bar{r}$ ≤۰/۱۵ و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۶

شکل ۳-۳۷: تغییر شرایط اولیه در برابر شیب برای گام‌های کوتاه و بلند راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0, \bar{r} = 0.05$..... ۹۸

شکل ۳-۳۸: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۸

شکل ۳-۳۹: (الف) زاویه پاها (ب) سرعت‌های زاویه‌ای در سیکل حدی مرتبه اول گام کوتاه راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۹

شکل ۳-۴۰: نمودار فضای فاز سیکل حدی مرتبه اول (الف) گام بلند (ب) گام کوتاه راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۹۹

شکل ۳-۴۱: نمودار مکان هندسی سیکل حدی مرتبه اول گام (الف) بلند (ب) کوتاه برای مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۱۰۰

شکل ۳-۴۲: نمودار مکان هندسی قطب‌ها برای یک گام بلند مرتبه اول مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0, \bar{r} = 0.05\ , \bar{a} = 0\ , \gamma = 0.009\ (rad)$..... ۱۰۱

شکل ۳-۴۳: تغییر شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند با تغییر شکل کف پا از سوزنی به منحنی با شعاع $\bar{r} = 0.05$ و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$..... ۱۰۲

شکل ۳-۴۴: نمودار مکان هندسی سیکل مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی در شیب (الف) ۰/۰۱۵ رادیان (ب) ۰/۰۱۶۵ رادیان با مشخصات $\bar{r} = 0.05, \beta = 0, \bar{a} = 0$ ۱۰۳

شکل ۳-۴۵: (الف) سیکل حدی مرتبه اول گام بلند (ب) نمودار فضای فاز آن برای مدل راه‌رونده با کف پای منحنی در محدوده ۰≤$\bar{r}$≤۰/۱۵ و مشخصات $\beta = 0, \bar{a} = 0, \gamma = 0.009\ (rad)$ ۱۰۴

شکل ۳-۴۶: (الف) نمودار مکان هندسی، (ب) تغییرات بزرگ‌ترین مقدار ویژه برای مدل راه‌رونده با کف پای منحنی در محدوده شعاع ۰≤$\bar{r}$≤۰/۱۵و مشخصات $\beta = 0, \bar{a} = 0, \gamma = 0.009\ (rad)$ ۱۰۴

شکل ۳-۴۷: تغییر شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\bar{a} = 0, \bar{r} = 0.05$ با توجه به تغییر نسبت جرمی از مقدار ۰ به ۰/۰۲..... ۱۰۶

شکل ۳-۴۸: نمودار مکان هندسی سیکل مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی در شیب ۰/۰۱۲۷ رادیان و مشخصات $\bar{r} = 0.05, \beta = 0.02, \bar{a} = 0$ ۱۰۷

شکل ۳-۴۹: تغییر دوره تناوب گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\bar{r} = 0.05, \beta = 0.02$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها..... ۱۰۹

شکل ۳-۵۰: تغییر شرایط اولیه سیکل حدی مرتبه اول گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0.02, \bar{r} = 0.05$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها..... ۱۰۹

شکل ۳-۵۱: (الف) سیکل حدی مرتبه اول گام بلند (ب) نمودار فضای فاز مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0.02, \bar{r} = 0.05, \bar{b} = \bar{a} = 0.5$ در شیب ۰/۰۰۹ رادیان..... ۱۱۰

شکل ۳-۵۲: جابه‌جایی مقادیر ویژه در نمودار مکان هندسی یک گام بلند راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصه $r = 0.05$ بر شیب ۰/۰۰۹ رادیان برای (الف) $\beta = 0$ (ب) $\beta = 0.02$ با توجه به تغییر ارتفاع مرکز جرم پاها..... ۱۱۰

شکل ۳-۵۳: حدس اولیه مناسب برای حل معادلات مقدار مرزی در سیکل مرتبه اول گام راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0, \bar{c} = \bar{d} = 0.0001, \bar{a} = 0, \gamma = 0.001\ (rad)$ ۱۱۲

شکل ۳-۵۴: پاسخ مرتبه اول کوتاه معادلات مقدار مرزی به همراه شرایط اولیه مناسب برای مدل راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0, \bar{c} = \bar{d} = 0.0001, \bar{a} = 0, \gamma = 0.001\ (rad)$ ۱۱۲

شکل ۳-۵۵: (الف) سیکل حدی مرتبه اول گام کوتاه (ب) نمودار فضای فاز مدل راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0, \bar{c} = \bar{d} = 0.0001, \bar{a} = 0, \gamma = 0.001\ (rad)$ ۱۱۳

شکل ۳-۵۶: (الف) سیکل حدی مرتبه اول گام کوتاه (ب) نمودار فضای فاز مدل راه رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0.02, \bar{c} = \bar{d} = 0.0001\ , \bar{a} = 0.25\ , \gamma = 0.001\ (rad)$ ۱۱۳

شکل ۳-۵۷: نمودار (الف) زاویه (ب) سرعت‌های زاویه‌ای پاهای راه‌رونده در برابر زمان برای یک گام بلند سیکل حدی مرتبه اول راه رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0\ , \bar{c} = \bar{d} = 0.0005$ در شیب ۰/۰۰۹ رادیان. ... ۱۱۵

شکل ۳-۵۸: تغییر دوره تناوب گام بلند مرتبه اول مدل راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$ برای مقادیر مختلف پاشنه و پنجه. ۱۱۶

شکل ۳-۵۹: تغییر شرایط اولیه گام بلند مرتبه اول مدل راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$ برای مقادیر مختلف پاشنه و پنجه. ۱۱۶

شکل ۳-۶۰: (الف) گشتاور کنترلی اعمالی در طول یک گام (ب) نمودار مکان هندسی سیکل گام بلند پایدار راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۵ رادیان. ۱۱۹

شکل ۳-۶۱: تغییر مقدار بیشینه گشتاور کنترلی با افزایش شیب الگوی راه‌روی پایدار در راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$ ۱۱۹

شکل ۳-۶۲: (الف) گشتاور کنترلی اعمالی در طول یک گام (ب) نمودار مکان هندسی سیکل گام بلند پایدار راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0, \bar{r} = 0.05$ در شیب ۰/۰۱۶۵ رادیان. ۱۲۰

شکل ۳-۶۳: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۵ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای. ۱۲۲

شکل ۳-۶۴: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۲ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای. ۱۲۳

شکل ۳-۶۵: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0\ , \bar{a} = 0\ , \bar{r} = 0.05$ در شیب ۰/۰۱۷ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای. ۱۲۴

شکل ۳-۶۶: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0.02\ , \bar{a} = 0\ , \bar{r} = 0.05$ در شیب ۰/۰۱۷ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای. ۱۲۴

شکل ۳-۶۷: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام کوتاه مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۵ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت پیوسته..... ۱۲۵

شکل ۳-۶۸: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام کوتاه مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۵ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت لحظه‌ای..... ۱۲۶

شکل ۳-۶۹: نمودار مکان هندسی گام کوتاه مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02 , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۵ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت لحظه‌ای..... ۱۲۶

شکل ۳-۷۰: (الف) شرایط اولیه مناسب (ب) نمودار مکان هندسی گام کوتاه مرتبه اول راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ در شیب ۰/۰۱۷ رادیان تحت اثر کنترل فیدبک حالت لحظه‌ای..... ۱۲۸

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مزایا و معایب انواع مختلف ربات‌های متحرک [۱و۴-۵]. ۴

جدول ۳-۱: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند و کوتاه مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ ۶۹

جدول ۳-۲: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه دوم گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0 , \bar{a} = 0$ ۷۷

جدول ۳-۳: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند و کوتاه مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02 , \bar{a} = 0$ ۸۰

جدول ۳-۴: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه دوم گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصات $\beta = 0.02 , \bar{a} = 0$ ۸۶

جدول ۳-۵: شرایط اولیه و دوره تناوب گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی براساس مقدار β و مشخصات $\bar{b} = \bar{a} = 0.5$ ۸۹

جدول ۳-۶: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند و کوتاه مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $(\beta = 0 , a = 0, \bar{r} = 0.05)$ ۹۷

جدول ۳-۷: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل مرتبه اول گام بلند و کوتاه مدل راه‌رونده با کف پای منحنی و مشخصات $\beta = 0.02 , \bar{a} = 0, \bar{r} = 0.05$ ۱۰۵

جدول ۳-۸: شرایط اولیه و دوره تناوب گام بلند مرتبه اول راه‌رونده با کف پای سوزنی براساس مقدار β و مشخصات $\bar{b} = \bar{a} = 0.5 , \bar{r} = 0.05$ ۱۰۸

جدول ۳-۹: شرایط اولیه و دوره تناوب سیکل حدی مرتبه اول گام بلند مدل راه‌رونده با کف پای مسطح و مشخصات $\beta = 0, \bar{a} = 0$ برای مقادیر مختلف پاشنه و پنجه. ۱۱۴

جدول ۳-۱۰: مقادیر شرایط اولیه و بردار بهره فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای در کنترل ناپایداری سیکل گام بلند. ۱۲۲

جدول ۳-۱۱: مقادیر شرایط اولیه و بردار بهره فیدبک حالت پیوسته و لحظه‌ای در کنترل ناپایداری سیکل گام کوتاه راه‌رونده با کف پای سوزنی و مشخصه $\bar{a} = 0$ ۱۲۷

۱- فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیقاتی