





دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

بررسی پدیده Shimmy در ارابه فرود هواپیما

پدیدآورنده:

مصطفی طوفانی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

استاد راهنما:

دکتر انوشیروان فرشیدیانفر

زمستان ۱۳۸۸

تاییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان

بررسی پدیده Shimmy در ارابه فرود هواپیما

که توسط **مصطفی طوفانی** تهیه و به هیئت داوران ارائه شده است، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مکانیک با گرایش طراحی کاربردی، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می باشد.

درجه ارزشیابی:

نمره:

تاریخ دفاع:

اعضای هیئت داوران:

استاد راهنما

دکتر انوشیروان فرشیدیان فر

استاد دفاع

دکتر جلیل رضایی پزند

استاد دفاع

دکتر حمید اختراعی طوسی

نماینده تحصیلات تکمیلی

دکتر بهنام معتکف ایمانی

تاییدیه

گواهی می‌شود این پایان‌نامه تا کنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

امضاء دانشجو:


مصطفی طوفانی

تاریخ

امضاء استاد راهنما:

انوشیروان فرشیدیان فر

تاریخ

<p>بسمه تعالی</p> <p>مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان</p> <p>دانشگاه فردوسی مشهد</p>		
 <p>عنوان رساله/پایان نامه: بررسی پدیده Shimmy در ارابه فرود هواپیما</p>		
<p>نام نویسنده: مصطفی طوفانی</p> <p>نام استاد(ان): راهنما: دکتر انوشیروان فرشیدیان فر</p> <p>نام استاد(ان) مشاور:</p>		
<p>دانشکده: مهندسی</p>	<p>گروه: مهندسی مکانیک</p>	<p>رشته تحصیلی: مکانیک طراحی کاربردی</p>
<p>تاریخ تصویب: ۸۶/۱۱/۳۰</p>		<p>تاریخ دفاع: ۸۸/۱۱/۵</p>
<p>مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ●</p>		<p>تعداد صفحات: ۲۱۶</p>
<p>چکیده رساله/پایان نامه :</p> <p>پدیده shimmy یک پدیده ارتعاشی خود تحریک می باشد که در آن چرخ ارابه فرود هواپیما حول محور عمود بر مجموعه در حال دوران، ارتعاش می کند. با توجه به آمار و ارقام ارائه شده از حوادث بر اثر این پدیده، امروزه اهمیت این موضوع بیش از پیش آشکار گردیده است.</p> <p>در این پروژه سعی شده است تا ماهیت این پدیده مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا ابتدا به معرفی ارابه فرود و انواع آن با ذکر برخی کاربردها پرداخته شده است. سپس تاریخچه ای جامع از تحقیقات انجام شده در این زمینه ذکر می گردد. آن گاه به دلیل اهمیت نقش تأثیر در نیروهای وارده بر ارابه فرود، مدل های ارائه شده برای تأثیر مورد بررسی قرار می گیرند.</p> <p>در گام بعدی، به بررسی خود پدیده shimmy پرداخته می شود. به همین منظور، سه مدل از این پدیده ارائه گردیده اند. مدل اول مدلی غیرخطی و ساده از ارابه فرود می باشد که در آن تأثیر ممان های پیچشی وارده بر قسمت های پایینی ارابه فرود لحاظ گردیده اند. در مدل دوم، نوعی از ارابه فرود که دارای دوردیف چرخ (بوگی) می باشد در نظر گرفته شد. این دو ردیف به صورت متقارن بوده و در آن اثر ممان های پیچشی در نظر گرفته شده است. در مدل سوم علاوه بر اثر ممان های پیچشی، ممان های خمشی وارده بر ارابه فرود نیز لحاظ گردیده اند. رفتار تأیر نیز در معادله الاستیک بر مبنای تئوری ریسمان ارتجاعی ارائه شده است.</p> <p>از روش های بررسی پدیده های غیرخطی، خطی سازی می باشد. پس از ارائه معادلات مربوط به هر یک از مدل ها، این معادلات خطی سازی شده و فضای حالت هر سیستم تشکیل می گردد. آنگاه به کمک معیار روث-هورویتس پایداری در سیستم ها مورد بررسی قرار می گیرد. با حل تحلیلی معادله مشخصه، رابطه ای جهت یافتن مرزهای پایداری حاصل می گردد. مرزهای پایداری نیز در محیط پارامتری هر سیستم، مورد بررسی قرار می گیرند.</p> <p>در نهایت با استفاده از نرم افزار MATLAB، ضمن مدل سازی غیرخطی هر یک از سیستم ها، پاسخ عددی آن ها بدست آمده و در هر حالت دامنه ارتعاشات سیستم تعیین می گردد. با استفاده از نتایج این بخش و با بررسی روند تغییر پارامترها در پایداری، صحت نتایج مدل های خطی سازی شده مورد بررسی قرار می گیرند.</p>		
<p>کلید واژه:</p> <p>۱. Shimmy</p> <p>۲. ارابه فرود</p> <p>۳. تأیر</p> <p>۴. ارتعاشات غیرخطی</p> <p>۵. خطی سازی</p> <p>۶. پایداری</p> <p>۷. مدل سازی</p>		<p>امضای استاد راهنما:</p> <p>تاریخ:</p>

سپاس خدایی را که به آدمی حیات و زندگی بخشید و او را توان داد تا حمد و ستایش الهی را به جای آورد.

درود و صلوات بر محمد ختم رسولان و سلاله پاکش، که پیام آور صلح و دوستی و نایانگر راه هدایت بشریتند.

تقدیر و شکر از استاد و راهنمای این جانب، دکتر فرشیدیان فرکه در تمامی مراحل این پروژه را سنا و کمک من بودند.

تقدیرم به پدر و مادرم که نه تنها در این مرحله، بلکه در تمامی مراحل زندگی، همواره یار و پشتیبان دلسوز من بوده و هستند.

تقدیرم به همسر مهربانم که با تحمل سختیها و زحمات این مسیر و مسیریهای آینده زندگی مشترکمان، همواره همراه و کمک من بوده و هست.

تقدیرم به برادرانم که از هیچ کونه گلی به من مضائقه نکردند.

تقدیر و شکر از دوستان و سایر عزیزانی که در انجام این پروژه سهمی داشته‌اند.

همچنین کمال شکر از اساتید محترم دکتر رضایی پزند، دکتر اختراعی طوسی و دکتر معتمد ایمانی که قبول زحمت نموده و در ارائه این پروژه

مشارکت داشتند.

و من ال... توفیق

فهرست مطالب

۷	فهرست مطالب
۱۲	فهرست علائم
۱۵	فهرست شکل‌ها
۲۲	فهرست جداول

۲۳

۱- فصل اول: مقدمه

۲۴	۱-۱- پیش‌گفتار
۲۵	۱-۲- تعریف پدیده Shimmy
۲۶	۱-۳- طرح کلی پروژه
۲۸	۱-۴- پیکربندی شماتیک پروژه

۳۰

۲- فصل دوم: آشنایی با پدیده Shimmy

۳۱	۲-۱- پیش‌گفتار
۳۱	۲-۲- آشنایی با ارابه فرود
۳۵	۲-۲-۱- دوچرخ اصلی
۳۶	۲-۲-۲- یک چرخ اصلی
۳۸	۲-۲-۳- ارابه فرود چرخ‌دمی
۴۰	۲-۲-۴- سه‌چرخه یا چرخ دماغه‌ای
۴۲	۲-۲-۵- چهارچرخه
۴۴	۲-۲-۶- چندچرخه
۴۷	۲-۳- تعاریف
۵۱	۲-۴- نگاهی به تاریخچه بررسی پدیده Shimmy
۵۱	۲-۴-۱- پیش از دهه ۱۹۵۰ میلادی

۵۴	۲-۴-۲ دهه ۱۹۵۰ میلادی
۵۶	۲-۴-۳ دهه ۱۹۶۰ میلادی
۵۷	۲-۴-۴ دهه ۱۹۷۰ میلادی
۵۹	۲-۴-۵ دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی
۶۳	۲-۴-۶-پس از سال ۲۰۰۰
۶۹	۲-۵-مدل سازی تأیر
۷۰	۲-۵-۱-مدل های شبه استاتیکی تأیر
۷۱	۲-۵-۲-مدل های دینامیک تأیر
۷۱	۲-۵-۳-مدل مقدماتی تأیر
۷۲	۲-۵-۴-مدل تحلیلی
۷۳	۲-۵-۵-مدل تأیر نیمه تجربی
۷۴	۲-۵-۶-مدل تأیر ریسمان ارتجاعی
۷۵	۲-۵-۷-مدل گذرای تأیر

۷۷

۳- فصل سوم: مدل سازی Shimmy

۷۸	۳-۱-پیش گفتار
۷۹	۳-۲-مدل اول : ممان های پیچشی
۷۹	۳-۲-۱-مدل سازی رفتار تأیر
۸۰	۳-۲-۲-مدل دینامیکی ارابه فرود
۸۴	۳-۳-مدل دوم: مدل بوگی
۸۴	۳-۳-۱-مدل سازی رفتار تأیرها
۸۵	۳-۳-۲-مدل دینامیکی ارابه فرود
۹۰	۳-۴-مدل سوم : ممان های پیچشی و خمشی
۹۱	۳-۴-۱-مدل دینامیک پیچشی ارابه فرود

- ۹۳ ۲-۴-۳ مدل دینامیک خمشی ارابه فرود
- ۹۴ ۳-۴-۳ معادله الاستیک تایر
- ۹۵ ۵-۳ گفتار پایانی

۹۷ ۴- فصل چهارم: حل معادلات به روش خطی سازی

- ۹۸ ۱-۴-۱ پیش گفتار
- ۹۸ ۲-۴-۲ مدل اول: ممان های پیچشی
- ۱۰۱ ۱-۲-۴ Shimmy تحلیل
- ۱۰۱ ۲-۲-۴ Shimmy به کمک مقادیر ویژه
- ۱۰۴ ۳-۲-۴ Shimmy به کمک تبدیل لاپلاس
- ۱۰۵ ۴-۲-۴ تحلیل پایداری
- ۱۰۸ ۵-۲-۴ مرزهای پایداری
- ۱۰۹ ۱-۵-۲-۴ تعیین مرزهای پایداری بر حسب طول بازوی چرخ e
- ۱۱۵ ۲-۵-۲-۴ تعیین مرزهای پایداری بر حسب C
- ۱۲۰ ۳-۴-۳ مدل دوم: مدل بوگی
- ۱۲۲ ۱-۳-۴ Shimmy تحلیل
- ۱۲۳ ۲-۳-۴ Shimmy به کمک مقادیر ویژه
- ۱۲۴ ۳-۳-۴ Shimmy به کمک تبدیل لاپلاس
- ۱۲۶ ۴-۳-۴ تحلیل پایداری
- ۱۲۹ ۵-۳-۴ مرزهای پایداری
- ۱۳۰ ۱-۵-۳-۴ تعیین مرزهای پایداری بر حسب طول بازوی چرخ e
- ۱۳۴ ۲-۵-۳-۴ تعیین مرزهای پایداری بر حسب C
- ۱۳۸ ۴-۴-۴ مدل سوم: با تاثیر خمش
- ۱۳۸ ۱-۴-۴ معادله دینامیک پیچشی

۱۴۰	۲-۴-۴-دینامیک خمشی
۱۴۱	۳-۴-۴-معادله الاستیک تأیر
۱۴۱	۴-۴-۴-تحلیل Shimmy
۱۴۲	۵-۴-۴-تحلیل Shimmy به کمک مقادیر ویژه
۱۴۴	۶-۴-۴-تحلیل Shimmy به کمک تبدیل لاپلاس
۱۴۷	۷-۴-۴-تحلیل پایداری
۱۵۰	۸-۴-۴-مرزهای پایداری
۱۵۱	۱-۸-۴-۴-تعیین مرزهای پایداری بر حسب طول بازوی چرخ e و مقادیر پیچشی
۱۵۵	۲-۸-۴-۴-تعیین مرزهای پایداری بر حسب طول بازوی چرخ e و مقادیر خمشی
۱۶۱	۵-۴-مقایسه
۱۶۵	۶-۴-گفتار پایانی

۵- فصل پنجم: مدل سازی غیر خطی

۱۶۷	
۱۶۸	۱-۵-پیش گفتار
۱۶۸	۲-۵-پاسخ های غیر خطی
۱۷۳	۳-۵-مدل اول : ممان های پیچشی
۱۹۱	۴-۵-مدل دوم: بوگی
۲۰۷	۵-۵-مدل سوم: ممان های پیچشی و خمشی
۲۲۷	۶-۵-گفتار پایانی

۶- فصل ششم: نتیجه گیری

۲۲۹	
۲۳۰	۱-۶-خلاصه مطالب
۲۳۲	۲-۶-نتیجه گیری

۲۳۵

۶-۳-پیشنهاد برای کارهای آینده

۲۳۸

۷-ضمائم

۲۴۱

۸-مراجع

فهرست علائم

a	نصف طول تماس تایر با زمین [m]
c	ضریب میرائی [N.m/rad/s]
c_ψ	ضریب میرائی پیچشی [N.m/rad/s]
c_d	ضریب میرائی خمشی [N.m/rad/s]
c_{fa}	ضریب نیروی جانبی تایر [1/rad]
c_g	ضریب کنترل [N.s ²]
c_{ma}	ضریب گشتاور همسوگر تایر [m/rad]
e	طول بازوی چرخ [m]
e_{eff}	طول بازوی موثر چرخ [m]
$f_1(\psi)$	تابعی خطی از زاویه چرخشی ψ [N.m]
$f_2(\psi, \dot{\psi})$	تابع هیستیریزیس از زاویه چرخشی ψ و سرعت زاویه چرخشی $\dot{\psi}$ [N.m]
$f_{4Fy}(\alpha)$	تابع نیروی جانبی تایر [N.m]
$f_{4Mz}(\alpha)$	تابع گشتاور بازگردان تایر [N.m]
$f_5(\delta)$	تابعی خطی از زاویه خمشی δ [N.m]
$f_6(\delta, \dot{\delta})$	تابعی از زاویه خمشی δ و سرعت زاویه خمشی $\dot{\delta}$ [N.m]
F_y	نیروی جانبی تایر [N]
F_z	نیروی عمودی [N]
i	واحد موهومی [-]
I_x	ممان اینرسی حول محور X [kgm ²]
I_z	ممان اینرسی حول محور Z [kgm ²]
k	ضریب ارتجاعی فنر [N.m/rad]
k_ψ	ضریب ارتجاعی فنر پیچشی [N.m/rad]
k_d	ضریب ارتجاعی فنر خمشی [N.m/rad]
$L_{1,2,3}$	ضرائب معادلات مرزهای پایداری [-]
l_g	طول ارابه فرود [m]
$m_{1...9}$	المان‌های ماتریس ضرائب [-]
M_1	گشتاور ارتجاعی پیچشی فنر [N.m]
M_2	گشتاور میرائی پیچشی [N.m]
M_3	گشتاور میرائی حاصل از دندان‌های چرخ [N.m]
M_4	مجموع گشتاورهای تایر حول محور Z [N.m]
M_4	مجموع گشتاورهای تایر چپ حول محور Z [N.m]
M_5	مجموع گشتاورهای تایر راست حول محور Z [N.m]

M_5	گشتاور ارتجاعی خمشی فنر [N.m]
M_6	گشتاور میرائی خمشی [N.m]
M_7	گشتاور اثر نیروها بر روی خمش عرضی [N.m]
M_z	گشتاور بازگردان تایر [N.m]
R	شعاع تایر [m]
s	ضریب لاپلاس [-]
t	زمان [s]
V	سرعت پیشروی تایر [m/s]
V_r	سرعت لغزش خالص تایر [m/s]
V_{rf}	سرعت لغزش خالص تایر چپ [m/s]
V_{rr}	سرعت لغزش خالص تایر راست [m/s]
V_t	سرعت انحراف خالص تایر [m/s]
V_{tf}	سرعت انحراف خالص تایر چپ [m/s]
V_{tr}	سرعت انحراف خالص تایر راست [m/s]
y	جابجایی عرضی تایر در نقطه تماس [m]
α	زاویه لغزش تایر [rad]
α_f	زاویه لغزش تایر چپ [rad]
α_r	زاویه لغزش تایر راست [rad]
α_g	حدود زاویه لغزش برای گشتاور همسوگر [deg]
α_{gf}	حدود زاویه لغزش چپ برای گشتاور همسوگر [deg]
α_{gr}	حدود زاویه لغزش راست برای گشتاور همسوگر [deg]
γ	زاویه انحراف [deg]
δ	حدود زاویه لغزش برای نیروی جانبی [deg]
δ_f	حدود زاویه لغزش چپ برای نیروی جانبی [deg]
δ_r	حدود زاویه لغزش راست برای نیروی جانبی [deg]
θ	زاویه نوسان [deg]
κ	ثابت گشتاور میرائی دندانه‌های چرخ [N.m ² /rad]
σ	طول آرامش تایر [m]
τ	ثابت زمانی دینامیک تایر [s]
φ	زاویه شیب [deg]
ψ	زاویه پیچشی ارابه فرود [rad]

هرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل دو چرخ اصلی [۷] ۱۴
- شکل ۲-۲: ارابه فرود دوچرخ هواپیمای B47-STRATOJET [۸] ۱۴
- شکل ۳-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل تک چرخ اصلی [۷] ۱۵
- شکل ۴-۲: هواپیمای U2 و ارابه فرود آن [۸] ۱۶
- شکل ۵-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل تک چرخ دمی [۷] ۱۸
- شکل ۶-۲: هواپیمای DC-3 و ارابه فرود چرخ‌دمی آن [۸] ۱۸
- شکل ۷-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل چرخ دماغه‌ای [۷] ۲۰
- شکل ۸-۲: جنگنده F-16 با ارابه فرود دماغه‌ای [۸] ۲۰
- شکل ۹-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل چهارچرخ [۷] ۲۱
- شکل ۱۰-۲: بمب افکن B-52 با ارابه فرود چهارچرخه [۸] ۲۱
- شکل ۱۱-۲: چیدمان چرخ‌ها در مدل چند چرخه [۷] ۲۳
- شکل ۱۲-۲: جت غول‌پیکر AN-225 با ارابه فرود چندچرخه [۸] ۲۳
- شکل ۱۳-۲: چیدمان چرخ‌ها در ارابه فرود [۳] ۲۴
- شکل ۱۴-۲: تصویر یک بوگی (BOGIE) ۲۴
- شکل ۱۵-۲: سیستم مختصات متصل به هواپیما ۲۵
- شکل ۱۶-۲: نمایش صفحه تایلر و برخی از پارامترهای آن ۲۷
- شکل ۱۷-۲: تفاوت سیستم پایدار و ناپایدار با توجه به معیار پایداری روث-هورویتس ۲۸
- شکل ۱۸-۲: تغییر مکان عرضی تایلر در مرکز چرخ در مدل ریسمان ارتجاعی [۵] ۳۰
- شکل ۱۹-۲: مدل تماس نقطه‌ای کلدیش برای تایلر [۳] ۳۲
- شکل ۲۰-۲: مدل غیرخطی زامسکی برای ارابه فرود [۱۹] ۴۰
- شکل ۲۱-۲: مدل چرخ پاسچکا با در نظر گرفتن وزن چرخ [۵] ۴۵
- شکل ۲۲-۲: مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط تاکاکس و استپن ۴۷
- شکل ۲۳-۲: سیستم مختصات استاندارد تایلر SAE [۱] ۴۷

- ۵۰ شکل ۲-۲۴: نمودار نیروی عرضی و گشتاور بازگردان بر حسب لغزش جانبی [۱]
- ۵۲ شکل ۲-۲۵: مدل تایر ریسمان ارتجاعی با یک و سه ردیف ریسمان [۶]
- ۵۴ شکل ۲-۲۶: توصیف عمومی مدل SWIFT [۳۲]
- ۵۹ شکل ۳-۱: شمایی از ارابه فرود و گشتاورهای وارده بر آن
- ۵۹ شکل ۳-۲: نمودار نیروی اصطکاکی نسبت به سرعت زاویه چرخشی
- ۶۰ شکل ۳-۳: مشخصات غیرخطی تایر [۱۸]
- ۶۲ شکل ۳-۴: ارابه فرود دو ردیفه (بوگی)
- ۶۸ شکل ۳-۵: مدل ارابه فرود با در نظر گرفتن ممانهای پیچشی و خمشی در قسمتهای پایین ارابه فرود
- ۷۷ شکل ۴-۱: مشخصات غیرخطی تایر [۱۹]
- ۸۴ شکل ۴-۲: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییر طول بازو و سرعتهای مختلف
- ۸۴ شکل ۴-۳: شکل ۲ از مقاله زامسکی، پایداری ریشه‌ها در نموداری بر حسب طول بازو [۱۸]
- ۸۵ شکل ۴-۴: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییرات سرعت پیشروی و طول بازو
- ۸۵ شکل ۴-۵: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار سه‌بعدی بر حسب تغییرات سرعت و طول بازوی چرخ
- ۸۶ شکل ۴-۶: محدوده پایداری در نمودار دوبعدی طول بازوی چرخ بر حسب سرعت پیشروی
- ۸۹ شکل ۴-۷: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازوی چرخ برای مقادیر مختلف ضریب میرائی
- ۸۹ شکل ۴-۸: مرزهای پایداری با تغییر میرائی، سرعت و طول بازو (داخل نمودار ناپایدار و خارج آن پایدار)
- ۹۰ شکل ۴-۹: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی فنر
- ۹۱ شکل ۴-۱۰: شکل ۳ از مقاله زامسکی [۱۸]، مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی فنر
- ۹۱ شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج حاصله با نتایج ارائه شده توسط زامسکی در مرجع [۱۸]
- ۹۲ شکل ۴-۱۲: مرزهای پایداری با تغییر سرعت، ضریب ارتجاعی فنر و طول بازو (داخل ناپایدار و خارج پایدار)
- ۹۴ شکل ۴-۱۳: مرزهای پایداری با تغییر ضریب میرائی و سرعت برای مقادیر مختلف نیروی عمودی
- ۹۴ شکل ۴-۱۴: شکل ۵ از مقاله زامسکی [۱۸]، مرزهای پایداری با تغییر ضریب میرائی و سرعت برای مقادیر مختلف نیروی عمودی
- ۹۵ شکل ۴-۱۵: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و ضریب میرائی برای مقادیر مختلف ممان اینرسی
- ۱۰۵ شکل ۴-۱۶: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییرات طول بازو و سرعت

- شکل ۴-۱۷: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییرات سرعت و طول بازو
 ۱۰۵
- شکل ۴-۱۸: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار سه‌بعدی بر حسب تغییرات سرعت و طول بازو
 ۱۰۶
- شکل ۴-۱۹: نمودار دو بعدی بررسی پایداری، طول بازو بر حسب سرعت
 ۱۰۷
- شکل ۴-۲۰: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازوی چرخ برای مقادیر مختلف ضریب میرائی
 ۱۰۹
- شکل ۴-۲۱: مرزهای پایداری با تغییر میرائی، سرعت و طول بازو (داخل نمودار ناپایدار و خارج پایدار)
 ۱۱۰
- شکل ۴-۲۲: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی فنر
 ۱۱۱
- شکل ۴-۲۳: مرزهای پایداری با تغییر سرعت، ضریب ارتجاعی و طول بازو (داخل ناپایدار و خارج پایدار)
 ۱۱۲
- شکل ۴-۲۴: مرزهای پایداری با تغییر ضریب میرائی و سرعت برای مقادیر مختلف نیروی عمودی
 ۱۱۳
- شکل ۴-۲۵: مرزهای پایداری با تغییر ضریب میرائی و سرعت، برای مقادیر مختلف ممان اینرسی
 ۱۱۴
- شکل ۴-۲۶: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییرات سرعت
 ۱۲۵
- شکل ۴-۲۷: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار دوبعدی بر حسب تغییرات طول بازو
 ۱۲۶
- شکل ۴-۲۸: بررسی پایداری ریشه‌ها در نمودار سه‌بعدی بر حسب تغییرات سرعت و طول بازوی چرخ
 ۱۲۷
- شکل ۴-۲۹: نمودار دو بعدی بررسی پایداری، طول بازو بر حسب سرعت
 ۱۲۷
- شکل ۴-۳۰: پایداری با تغییر سرعت و طول بازوی چرخ برای مقادیر مختلف ضریب میرائی پیچشی
 ۱۳۰
- شکل ۴-۳۱: مرزهای پایداری با تغییر میرائی، سرعت و طول بازو (داخل نمودار ناپایدار و خارج پایدار)
 ۱۳۱
- شکل ۴-۳۲: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی پیچشی فنر
 ۱۳۲
- شکل ۴-۳۳: مرزهای پایداری با تغییر سرعت، ضریب ارتجاعی پیچشی و طول بازو (داخل ناپایدار و خارج پایدار)
 ۱۳۳
- پایدار
- شکل ۴-۳۴: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب میرائی خمشی
 ۱۳۵
- شکل ۴-۳۵: مرزهای پایداری با تغییر میرائی خمشی، سرعت و طول بازو (داخل نمودار ناپایدار و خارج پایدار)
 ۱۳۵
- شکل ۴-۳۶: مرزهای پایداری با تغییر سرعت و طول بازو برای مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی خمشی فنر
 ۱۳۷
- شکل ۴-۳۷: مرزهای پایداری با تغییر سرعت، ضریب ارتجاعی خمشی فنر و طول بازو (داخل پایدار و خارج ناپایدار)
 ۱۳۷
- ناپایدار
- شکل ۴-۳۸: مقایسه بین مدل‌های ارائه شده برای ارابه فرود با مقادیر یکسان
 ۱۳۹
- شکل ۴-۳۹: مقایسه بین مدل اول و سوم با حذف اثرات خمشی در مدل سوم
 ۱۴۱

- شکل ۴-۴۰: بررسی علت افزایش ناپایداری در مدل سوم با افزایش ضریب ارتجاعی پیچشی
- شکل ۵-۱: نمودار زاویه لغزش A در برابر زمان، حالت پایدار
- شکل ۵-۲: نمودار فضای حالت زاویه پیچشی Ψ نسبت به زمان حالت پایدار
- شکل ۵-۳: نمودار زاویه لغزش A در برابر زمان، حالت ناپایدار
- شکل ۵-۴: نمودار فضای حالت زاویه پیچشی Ψ نسبت به زمان حالت ناپایدار
- شکل ۵-۵: نمودار زاویه لغزش A در برابر زمان چرخه حدی پایدار خارج شونده
- شکل ۵-۶: نمودار فضای حالت زاویه پیچشی Ψ نسبت به زمان. چرخه حدی پایدار خارج شونده
- شکل ۵-۷: نمودار زاویه لغزش A در برابر زمان چرخه حدی پایدار داخل شونده
- شکل ۵-۸: نمودار فضای حالت زاویه پیچشی Ψ نسبت به زمان چرخه حدی پایدار داخل شونده
- شکل ۵-۹: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۷
- شکل ۵-۱۰: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۷
- شکل ۵-۱۱: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار زاویه لغزش برحسب زمان ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۷
- شکل ۵-۱۲: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۷
- شکل ۵-۱۳: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۹
- شکل ۵-۱۴: بررسی دقیقتر مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۹
- شکل ۵-۱۵: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۹
- شکل ۵-۱۶: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در ضریب میرایی پیچشی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۱۳

- شکل ۵-۱۷: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۱۳
- شکل ۵-۱۸: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در ضریب میرایی پیچشی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۱۵
- شکل ۵-۱۹: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۱۵
- شکل ۵-۲۰: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۰
- شکل ۵-۲۱: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۰
- شکل ۵-۲۲: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار زاویه لغزش بر حسب زمان ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۰
- شکل ۵-۲۳: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۰
- شکل ۵-۲۴: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۲
- شکل ۵-۲۵: بررسی دقیقتر مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۲
- شکل ۵-۲۶: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۲
- شکل ۵-۲۷: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در ضریب میرایی پیچشی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۴
- شکل ۵-۲۸: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۴
- شکل ۵-۲۹: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در ضریب میرایی پیچشی، توسط حل عددی معادله

شکل ۴-۲۵: بررسی فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۵

۱۸۴

شکل ۵-۳۰: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۲۵

۱۸۷

شکل ۵-۳۱: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۸۸

شکل ۵-۳۲: بررسی دقیقتر مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله

غیرخطی در نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۹۰

شکل ۵-۳۳: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۹۱

شکل ۵-۳۴: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت خمشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۹۲

شکل ۵-۳۵: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار زاویه لغزش بر حسب زمان ($\Psi_0=1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۹۴

شکل ۵-۳۶: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۰

۱۹۶

شکل ۵-۳۷: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۲

۱۹۷

شکل ۵-۳۸: بررسی دقیقتر مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله

غیرخطی در نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۲

۱۹۸

شکل ۵-۳۹: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۲

۲۰۰

شکل ۵-۴۰: بررسی دقیق مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله

غیرخطی در نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۴

۲۰۱

شکل ۵-۴۱: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در

نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۴

- ۲۰۳ شکل ۵-۴۲: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در طول بازوی چرخ، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۶
- ۲۰۴ شکل ۵-۴۳: بررسی مرزهای پایداری، با تاثیر تغییر در سرعت پیشروی، توسط حل عددی معادله غیرخطی در نمودار فضای حالت پیچشی ($\Psi_0=0.1 \text{ RAD}$) مربوط به شکل ۴-۳۶
- ۲۱۶ شکل آ-۱: نمودار بلوک دیاگرام مربوط به مدل اول (ممان‌های پیچشی) در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB
- ۲۱۷ شکل آ-۲: نمودار بلوک دیاگرام مربوط به مدل دوم (بوگی) در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB
- ۲۱۸ شکل آ-۳: نمودار بلوک دیاگرام مربوط به مدل سوم (ممان‌های پیچشی و خمشی) در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB