بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بررسی اثر کشیدگی کابل بر دینامیک و کنترل یک نوع ربات کابلی

نگارش:

محمّد نصیری

استاد راهنما:

دکتر امیر لطف آور

استاد مشاور:

دکتر امیر امیدوار

آبان ۱۳۹۲

بسمه تعالی

بررسی اثر کشیدگی کابل بر دینامیک و کنترل ربات های کابلی

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

محمّد نصیری

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: .....

دکتر امیر لطف آور استادیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما) .....

دکتر امیر امیدوار استادیار مهندسی مکانیک (استاد مشاور) .....

دکتر علیرضا توکل پورصالح استادیار مهندسی مکانیک (استاد داور) .....

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

اینجانب **محمد نصیری** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک** مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** به شماره دانشجویی **۹۰۱۴۴۰۱۵** تأیید می نماید کلیه نتایج این پایان نامه/رساله، بدون هیچگونه دخل و تصرف ، حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان نامه با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز، مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین نامه های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را، نسبت به رأی صادره، از خود ساقط می کند. همچنین، هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان نامه/رساله در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی دراین زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان نامه/ رساله را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

محمّد نصیری

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقرارت دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

امیر لطف‌آور

تاریخ

امضا:

تقدیم به:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخت تا در سایه سار درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. تقدیم به روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده‌اند دستم را گرفتند و مرا راه رفتن در وادی پر نشیب و فراز زندگی آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند.

تقدیم به مهربان فرشتگانی که

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آن‌هاست، تقدیم به خواهران و برادرانم.

تقدیم به خانواده ام.

سپاسگزاری:

آنچه در ابتدای راه مشکل می نماید همیشه در سایه کسانی که دوستت می‌دارند آسان می‌شود. وقتی که آفتاب می‌تابد تازه در می‌یابیم که هیچ گرمایی فروزنده‌تر از حضور و هم‌آوایی دوستان و عزیزانی نیست که در کنار ما هر لحظه تلاش بر تماشا کردن موفقیت ما دارند.

اگر می‌شود محبت عزیزان را در سخن پاسخ گفت، پس سخن من قدرتمند است و چون نیست، به اینکه در سخنم صداقت است بسنده می‌کنم و سپاس می‌گویم پدر و مادری را که در مقابل لطف و آفتاب وجودشان ... من چه کنم؟

سپاس از ریاست محترم دانشگاه جناب آقای دکتر جم و ریاست محترم دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، جناب آقای دکتر علیرضا ستوده.

در پایان لازم می‌دانم که از استاد راهنمای فرهیخته‌ام، جناب آقای دکتر امیر لطف‌آور که در طول ترم‌های متوالی دلسوزانه یار و یاورم بودند تشکر و قدرانی کنم. استادی که رهنمودهای ایشان زیبنده سخنم و افتخار همراهی ایشان تا ابد در ذهنم به یادگار خواهد ماند. از استاد مشاورم جناب آقای دکتر امیر امیدوار به خاطر رهنمودهای علمی و اخلاقی ارزنده‌شان بسیار سپاسگزارم و سپاس از روزگار که مرا افتخاری چنین بخشید.

... و هر آنکه دست نوشته مرا به هنر نگاه می‌کند.

چکیده

بررسی اثر کشیدگی کابل بر دینامیک و کنترل ربات های کابلی

نگارش:

محمّد نصیری

ربات‌های موازی کابلی دارای ویژگی‌های منحصر بفردی برای اهداف مختلفی نظیر؛ تعمیر و نگهداری در لنگرگاه‌ها و آشیانه هواپیماها، حمل ونقل، انجام عملیات جوشکاری، بازبینی خطوط لوله و رادیوتلسکوپ‌ها و نظایر آن هستند که آن‌ها را از سایر ربات‌ها متمایز می‌سازند. ویژگی‌هایی نظیر وسعت فضای‌کاری، قابلیت مونتاژ و دمونتاژ سریع، اینرسی پایین قسمت‌های متحرک، حمل و نقل آسان، به همراه هزینه ساخت و نگهداری پایین سبب شده است تا این گروه از ربات‌ها مورد توجه واقع شده و دارای کاربردی گسترده و روز افزون در موارد گوناگون گردند. جایگزینی کابل-های منعطف به جای بازوهای صلب محدودیت‌هایی نظیر قید کششی بودن کابل‌ها که خود سبب پیچیدگی فضای‌کاری و وابستگی آن به تحلیل نیرویی می‌شود را پیش روی محققین قرار داده است .از همین روی، انعطاف موجود در کابل باید هم در بحث مدل سازی و هم پیشنهاد الگوریتم کنترلی مورد توجه واقع شود. در این پایان نامه نگرشی نو به این مسأله داریم و در همین راستا به بررسی اثر کشیدگی کابل بر دینامیک و کنترل ربات می‌پردازیم.

کلیدواژگان: ربات موازی، ربات‌های موازی کابلی، سینماتیک، دینامیک، کنترل

فهرست علائم

q	بردار متغیرهای ربات
x	بردار موقعیت قاب متحرک
J_x	مشتق تابع ضمنی نسبت به بردار موقعیت قاب متحرک
J_q	مشتق تابع ضمنی نسبت به بردار متغیرهای ربات
δx	تغییر مجازی در موقعیت مجری نهایی
δq	تغییر مجازی در متغیرهای عملگرهای ربات
W	نیروی اعمال شده از مجری نهایی به محیط
f	نیروی کابلی
J	ماتریس ژاکوبین
$J^{\dagger}$	سدواینورس ماتریس ژاکوبین
F_N	فریم مختصات جهانی
F_B	فریم مختصات محلی
B_i	نقاط ثابت بر روی فریم پایه
A_i	نقاط متحرک واقع بر عملگر نهایی
θ	زاویه دوران دستگاه مختصات جهانی حول محور عمود بر صفحه
${}^{N}R_B$	ماتریس دوران بین دوستگاه مختصات محلی و جهانی
x_G	مختصه x مرکز جرم عملگر نهایی
y_G	مختصه y مرکز جرم عملگر نهایی
z_G	مختصه z مرکز جرم عملگر نهایی
T	ماتریس تبدیل
$\dot{X}$	سرعت در دستگاه مختصات دکارتی
$\dot{L}$	سرعت کابل‌ها

$\tilde{J}$	ماتریس ژاکوبین اصلاح شده
ω	سرعت زاویه‌ای در دستگاه مختصات محلی
$\vec{U}$	بردار نیروهای کششی در کابل‌ها
$\dot{\Theta}$	سرعت زاویه‌ای هر یک از محورهای مختصات محلی حول خودش
α_i	شتاب زاویه‌ای هر یک از محورهای مختصات محلی حول خودش
P	ماتریس ژاکوبین تبدیل بین سرعت‌های اویلری و مرجع
L_i	طول کابل‌ها
J^{-1}	ماتریس ژاکوبین معکوس
$I_{3\times3}$	ماتریس همانی 3×3
$\vec{c}_i$	بردار مکان مرکز جرم عملگر نهایی
$\vec{b}_i$	بردار مکان محل اتصال کابل‌ها به پایه در مختصات جهانی
$\bar{I}$	ممان اینرسی حول مرکز جرم عملگر نهایی
K	ماتریس ژاکوبین اصلاح شده
$\vec{G}$	بردار نیروهای گرانشی
M	ماتریس جرم عملگر نهایی
$C\dot{X}$	ماتریس شامل ترم‌های کریولیس و جانب مرکز
L_{1_i}	طول کشیده شده کابل‌ها
L_{2_i}	طول کشیده نشده کابل‌ها
£	لاگرانژین
P_0	انرژی پتانسیل قسمت صلب ربات
P_1	انرژی پتانسیل ناشی از خاصیت کشسانی کابل‌ها
$V(x,\dot{x})$	ماتریس ترم‌های کوریولیس و جانب مرکز
F_d	ماتریس ضرایب اصطکاک ویسکوز
F_s	بردار اصطکاک خشک

T_d	بردار اغتشاش یا تاثیر دینامیک‌های مدل نشده ولی محدود
K_P	ماتریس بهره تناسبی
K_v	ماتریس بهره مشتقی
τ	دستور کنترل
u_0	ورودی کنترل کمکی
$\tilde{x}$	بردار خطای متغیرهای سیستم
$\dot{\tilde{x}}$	بردار سرعت خطای متغیرهای سیستم
$\ddot{\tilde{x}}$	بردار شتاب خطای متغیرهای سیستم
V	تابع لیاپانف
K_s	ماتریس سختی متغیر لحظه‌ای
E	مدول الاستیسیته
a	فاصله مرکز جرم عملگر نهایی تا نقطه اتصال کابل‌ها
N	عددی تصادفی بین $[-1,1]$
$erfc$	تابع خطا
σ^*	انحراف استاندار
$T.I.$	شدت آشفتگی
F_{drag}	نیروی درگ
C_d	ضریب درگ

فهرست مطالب

فصل اول **۱**

۱-۱-مقدمه **۱**

۱-۲-ربات های موازی **۲**

۱-۳-ربات های موازی کابلی **۶**

۱-۳-۱- دسته بندی ربات های کابلی ۷

۱-۳-۲- برخی ربات های موازی کابلی مورد استفاده در صنعت ۱۱

۱-۳-۳- پیشینه علمی موضوع ۱۷

۱-۴-جمع بندی **۲۴**

۱-۵-ساختار تنظیم پایان نامه **۲۵**

فصل دوم **۲۶**

۲-۱- مقدمه **۲۶**

۲-۲- فضای کاری ربات های موازی **۲۶**

۲-۳- فضای کاری ربات موازی کابلی **۲۷**

۲-۳-۱- ماتریس ژاکوبین و تکینگی ربات ۲۸

۲-۳-۲- نیروی کششی کابل ۲۹

۲-۴- جمع بندی **۳۳**

فصل سوم **۳۴**

۳-۱- مقدمه **۳۴**

۳-۲- سینماتیک معکوس ربات موازی کابلی **۳۶**

۳-۲-۱- سینماتیک معکوس ربات موازی کابلی صفحه ای ۳۶

۳-۲-۲ - سینماتیک معکوس ربات موازی کابلی فضایی ۴۰

۳-۳- جمع بندی **۴۵**

فصل چهارم **۴۶**

۴-۱- مقدمه **۴۶**

۴-۲- دینامیک ربات موازی کابلی در حالت صفحه ای **۴۷**

۴-۳- دینامیک ربات های موازی کابلی در حالت سه بعدی **۴۹**

۴-۳-۱- دینامیک ربات موازی کابلی در حالت فضایی بدون در نظر گرفتن اثر انعطاف در کابل ها ۴۹

۴-۳-۲- دینامیک ربات موازی کابلی در حالت فضایی با در نظر گرفتن اثر انعطاف در کابل ها ۵۱

۴-۴- جمع بندی **۵۴**

فصل پنجم **۵۵**

۵-۱- مقدمه **۵۵**

۵-۲- طراحی کنترلر بر اساس لیاپانف **۵۵**

۵-۳- طراحی کنترلر مقاوم ردیاب خطا **۵۷**

۵-۳-۱- کنترلر نیرو ۵۷

۵-۳-۲- اثبات پایداری ۵۸

۵-۴- شبیه سازی اغتشاش(مدلسازی باد) **۶۰**

۵-۴-۱- شبیه سازی اغتشاش ورودی به سیستم ۶۲

۵-۵- جمع بندی **۶۳**

فصل ششم **۶۴**

۶-۱- مقدمه **۶۴**

۶-۲- مسیر مطلوب طراحی شده **۶۵**

۶-۳- شبیه سازی بدون وجود اغتشاش و عدم قطعیت در نیرو **۶۷**

۶-۳-۱- ربات کابلی با ماتریس سختی ثابت ۶۷

۶-۳-۲- ربات کابلی با ماتریس سختی متغیر لحظه ای ۷۱

۶-۴- صحت سنجی با ایجاد تغییر در مسیر و پارامترهای سیستم **۷۵**

۶-۴-۱- شبیه سازی بدون وجود اغتشاش و عدم قطعیت نیرو ۷۷

۶-۴-۲- شبیه سازی کنترل بر پایه لیاپانف در حضور اغتشاش ۸۱

۶-۴-۳- شبیه سازی کنترل مقاوم ردیاب خطا در حضور اغتشاش ۸۵

۶-۵- جمع بندی **۹۰**

فصل هفتم **۹۱**

۷-۱- نتیجه گیری **۹۱**

۷-۲- ارائه پیشنهادات **۹۳**

۷-۲-۱- دینامیک ربات های کابلی و کنترل آن ها با در نظر گرفتن اثر انعطاف در کابل ها ۹۳

۷-۲-۲- طراحی کنترلر ۹۳

۷-۲-۳- پیاده سازی عملی سیستم ۹۴

۷-۲-۴- ایده های طراحی ۹۵

مراجع **۹۶**

فهرست تصاویر و شکل ها

شکل۱- ۱ نمونه ای از یک ربات سری ۶ درجه آزادی ۳
شکل۱- ۲ نمونه ای از یک ربات موازی(ارائه شده توسط شرکت ربایتکABB) [۱] ۳
شکل۱- ۳ کاربرد ربات موازی گو در تست تایر[۲] ۳
شکل۱- ۴ ربات موازی طراحی شده توسط استوارت[۱] ۴
شکل۱- ۵ مکانیزم استوارت-گو[۵] ۴
شکل۱- ۶ ساختار دیگری از ربات استوارت که توسط شرکت Hydra ارائه شده است[۶]. ۴
شکل۱- ۷ کاربرد مکانیزم استوارت در زمینه شبیه سازی پرواز[۶] ۵
شکل۱- ۸ فضای کاری ربات استوارت در صفحه $z=0$ - خطوط آبی بیانگر مرزهای فضای کاری و خطوط قرمز مبین نقاط تکینگی می باشند[۱]. ۵
شکل۱- ۹ ربات موازی طراحی شده توسط شرکت ABB با نام تجاری Flexpicker[۶]. ۵
شکل۱- ۱۰ ساختار شماتیک یک ربات موازی کابلی[۶] ۶
شکل۱- ۱۱ مهمترین قسمتهای یک ربات موازی کابلی ۷
شکل۱- ۱۲ شماتیک کلی ربات بتابوت [۱۱] ۸
شکل۱- ۱۳طرح شماتیکی از یک نمونه ربات کابل آویزان [۱۳] ۹
شکل۱- ۱۴دوربین کنترل شده توسط محرک های کابلی[۱۶] ۹
شکل۱- ۱۵ نمونه ای از قرار گیری SkyCam در یک ورزشگاه[۶] ۹
شکل۱- ۱۶ نمونه هایی از ربات های کابلی مقید کامل و مقید ناقص ۱۰
شکل۱- ۱۷ ربات موازی کابلی هوشمند جابجاگر بار جهت حمل محموله ها بر روی کشتی[۲۵] ۱۱
شکل۱- ۱۸ ربات موازی کابلی NIST Robocrane[۲۵]. ۱۲
شکل۱- ۱۹ نمایی از ربات ربوکرین [۲۴] ۱۲
شکل۱- ۲۰ ربات موازی کابلی SEGESTA از هفت عملگر کابلی بهره برده است [۲۶]. ۱۳
شکل۱- ۲۱ ربات موازی کابلی WARP با اندازه های بهنیه شده(واحد متریک)[۳۰]. ۱۴
شکل۱- ۲۲ نمونه کاربردی ربات موازی کابلی استرینگ- من[۳۴] ۱۵
شکل۱- ۲۳ ربات کابلی ماریبوت طراحی شده برای توانبخشی اندام فوقانی ۱۵
شکل۱- ۲۴ ربات کابلی طراحی شده برای توانبخشی پاها و لگن توسط هوما ۱۵
شکل۱- ۲۵ ربات کابلی مکآرم از نوع مقید کامل با کاربرد پزشکی در توانبخشی برای قسمت بالا تنه ۱۶
شکل۱- ۲۶ ربات موازی کابلی SkyCam بکار گرفته شده در صنعت تصویر برداری [۹] ۱۶
شکل۱- ۲۷ نمایی از ربات کابلی ارائه شده توسط بویگاس و همکارانش [۱۱۰] ۲۳
شکل۲- ۱ i امین اتصال مکانیزم ۲۹
شکل۳- ۱ طراحی های مختلف ربات های موازی کابلی ۳۵
شکل۳- ۲ ربات موازی کابلی با بازوهای تلسکوپی ۳۶

شکل۳- ۳ ربات کابلی در حالت دوبعدی(صفحه ای) ۳۷
شکل۳- ۴ ربات موازی کابلی در حالت سه بعدی(فضایی) به همراه معرفی طول کابل ها ۴۰
شکل۴- ۱ تعریف بستار برداری مربوط به کابل i ام ۴۷
شکل۴- ۲ شماتیک بردار نیروهای وارد بر عملگر نهایی ۴۸
شکل۴- ۳ ترسیمه بستار برداری مربوط به i امین کابل در حالت فضایی ۴۹
شکل۴- ۴ شماتیک تغییر طول کابل ها ۵۲
شکل۵- ۱ اغتشاش شبیه سازی شده با سرعت های متوسط ۵، ۱۵ و۲۵متر بر ثانیه ۶۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۱- ۱ مقایسه بین ربات های مختلف[۱۸] ۱۰
جدول ۵- ۱ خصوصیات باد بر حسب مقیاس بیوفورت[۱۲۷] ۶۱
جدول ۵- ۲ آثار باد[۱۲۷] ۶۲
جدول ۵- ۳ پارامترهای مورد استفاده جهت مدلسازی باد ۶۲
جدول ۶- ۱ پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه سازی ربات کابلی با ماتریس سختی ثابت ۶۷
جدول ۶- ۲ پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه سازی ربات کابلی با ماتریس متغیر لحظه ای ۷۷

فهرست نمودارها

نمودار۶- ۱ مسیر مطلوب در راستای x ۶۵
نمودار۶- ۲ مسیر مطلوب در راستای y ۶۵
نمودار۶- ۳ مسیر مطلوب در راستای z ۶۶
نمودار۶- ۴ مسیر مطلوب در جهت φ ۶۶
نمودار۶- ۵ مسیر مطلوب در جهت θ ۶۶
نمودار۶- ۶ مسیر مطلوب در جهت ψ ۶۶
نمودار۶- ۷مسیر طراحی شده در فضای ۳بعدی ۶۶
نمودار۶- ۸ مسیر پیروی شده در جهت x ۶۸
نمودار۶- ۹ خطای ناشی از پیروی مسیر در جهت x ۶۸
نمودار۶- ۱۰ مسیر پیروی شده در جهت y ۶۸
نمودار۶- ۱۱ خطای حاصل از پیروی مسیر در جهت y ۶۸
نمودار۶- ۱۲ مسیر پیروی شده در جهت z ۶۸
نمودار۶- ۱۳ خطای حاصل از پیروی مسیر در جهت z ۶۸
نمودار۶- ۱۴ مسیر پیروی شده در جهت φ ۶۹
نمودار۶- ۱۵ خطای حاصل از پیروی مسیر در جهت φ ۶۹
نمودار۶- ۱۶ مسیر پیروی شده در جهت θ ۶۹
نمودار۶- ۱۷ خطای حاصل از پیروی مسیر در جهت θ ۶۹
نمودار۶- ۱۸ مسیر پیروی شده در جهت ψ ۶۹
نمودار۶- ۱۹ خطای حاصل از پیروی مسیر در جهت ψ ۶۹
نمودار۶- ۲۰ تغییرات نیرو در کابل اول ۷۰
نمودار۶- ۲۱ تغییرات نیرو در کابل دوم ۷۰
نمودار۶- ۲۲ تغییرات نیرو در کابل سوم ۷۰
نمودار۶- ۲۳ تغییرات نیرو در کابل چهارم ۷۰
نمودار۶- ۲۴ تغییرات نیرو در کابل پنجم ۷۰
نمودار۶- ۲۵ تغییرات نیرو در کابل ششم ۷۰
نمودار۶- ۲۶ تعقیب مسیر در راستایx ۷۱
نمودار۶- ۲۷ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای x ۷۱
نمودار۶- ۲۸ تعقیب مسیر در راستایy ۷۱
نمودار۶- ۲۹ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای y ۷۱

نمودار۶- ۳۰ تعقیب مسیر در راستایz ۷۲
نمودار۶- ۳۱ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای z ۷۲
نمودار۶- ۳۲ تعقیب مسیر در راستایφ ۷۲
نمودار۶- ۳۳ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای φ ۷۲
نمودار۶- ۳۴ تعقیب مسیر در راستایθ ۷۲
نمودار۶- ۳۵ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستایθ ۷۲
نمودار۶- ۳۶ تعقیب مسیر در راستایψ ۷۳
نمودار۶- ۳۷ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستایψ ۷۳
نمودار۶- ۳۸ تغییرات نیرو در کابل اول ۷۳
نمودار۶- ۳۹ تغییرات نیرو در کابل دوم ۷۳
نمودار۶- ۴۰ تغییرات نیرو در کابل سوم ۷۳
نمودار۶- ۴۱ تغییرات نیرو در کابل چهارم ۷۳
نمودار۶- ۴۲ تغییرات نیرو در کابل پنجم ۷۴
نمودار۶- ۴۳ تغییرات نیرو در کابل ششم ۷۴
نمودار۶- ۴۴ تغییرات طول کشیده نشده کابل اول ۷۴
نمودار۶- ۴۵ تغییرات طول کشیده نشده کابل دوم ۷۴
نمودار۶- ۴۶ تغییرات طول کشیده نشده کابل سوم ۷۴
نمودار۶- ۴۷ تغییرات طول کشیده نشده کابل چهارم ۷۴
نمودار۶- ۴۸ تغییرات طول کشیده نشده کابل پنجم ۷۵
نمودار۶- ۴۹ تغییرات طول کشیده نشده کابل ششم ۷۵
نمودار۶- ۵۰ مسیر مطلوب در راستای x ۷۶
نمودار۶- ۵۱ مسیر مطلوب در راستای y ۷۶
نمودار۶- ۵۲ مسیر مطلوب در راستای z ۷۶
نمودار۶- ۵۳ مسیر مطلوب در راستای φ ۷۶
نمودار۶- ۵۴ مسیر مطلوب در راستای θ ۷۶
نمودار۶- ۵۵ مسیر مطلوب در راستای ψ ۷۶
نمودار۶- ۵۶ مسیر طراحی شده در فضای ۳بعدی ۷۷
نمودار۶- ۵۷ تعقیب مسیر در راستایx ۷۸
نمودار۶- ۵۸ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای x ۷۸
نمودار۶- ۵۹ تعقیب مسیر در راستایy ۷۸
نمودار۶- ۶۰ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای y ۷۸
نمودار۶- ۶۱ تعقیب مسیر در راستایz ۷۸
نمودار۶- ۶۲ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای z ۷۸
نمودار۶- ۶۳ تعقیب مسیر در راستایφ ۷۹
نمودار۶- ۶۴ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای φ ۷۹

نمودار۶- ۶۵ تعقیب مسیر در راستایθ ۷۹
نمودار۶- ۶۶ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستایθ ۷۹
نمودار۶- ۶۷ تعقیب مسیر در راستایψ ۷۹
نمودار۶- ۶۸ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستایψ ۷۹
نمودار۶- ۶۹ نیروی کششی در کابل اول ۸۰
نمودار۶- ۷۰ نیروی کششی در کابل دوم ۸۰
نمودار۶- ۷۱ نیروی کششی در کابل سوم ۸۰
نمودار۶- ۷۲ نیروی کششی در کابل چهارم ۸۰
نمودار۶- ۷۳ نیروی کششی در کابل پنجم ۸۰
نمودار۶- ۷۴ نیروی کششی در کابل ششم ۸۰
نمودار۶- ۷۵ تغییرات طول کشیده نشده کابل اول ۸۱
نمودار۶- ۷۶ تغییرات طول کشیده نشده کابل دوم ۸۱
نمودار۶- ۷۷ تغییرات طول کشیده نشده کابل سوم ۸۱
نمودار۶- ۷۸ تغییرات طول کشیده نشده کابل چهارم ۸۱
نمودار۶- ۷۹ تغییرات طول کشیده نشده کابل پنجم ۸۱
نمودار۶- ۸۰ تغییرات طول کشیده نشده کابل ششم ۸۱
نمودار۶- ۸۱ تعقیب مسیر در راستای x ۸۲
نمودار۶- ۸۲ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای x ۸۲
نمودار۶- ۸۳ تعقیب مسیر در راستای y ۸۲
نمودار۶- ۸۴ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای y ۸۲
نمودار۶- ۸۵ تعقیب مسیر در راستای z ۸۲
نمودار۶- ۸۶ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای z ۸۲
نمودار۶- ۸۷ تعقیب مسیر در راستای φ ۸۳
نمودار۶- ۸۸ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای φ ۸۳
نمودار۶- ۸۹ تعقیب مسیر در راستای θ ۸۳
نمودار۶- ۹۰ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای θ ۸۳
نمودار۶- ۹۱ تعقیب مسیر در راستای ψ ۸۳
نمودار۶- ۹۲ خطای ناشی از تعقیب مسیر در راستای ψ ۸۳
نمودار۶- ۹۳ نیروی کششی در کابل اول ۸۴
نمودار۶- ۹۴ نیروی کششی در کابل دوم ۸۴
نمودار۶- ۹۵ نیروی کششی در کابل سوم ۸۴
نمودار۶- ۹۶ نیروی کششی در کابل چهارم ۸۴
نمودار۶- ۹۷ نیروی کششی در کابل پنجم ۸۴
نمودار۶- ۹۸ نیروی کششی در کابل ششم ۸۴
نمودار۶- ۹۹ تغییرات طول کشیده نشده کابل اول ۸۵