

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

## طراحی و تحلیل ربات کابلی فضایی برای یک عملیات ساخت در تعامل با اپراتور انسانی

نگارنده: نسترن نقیب زاده

استاد راهنما:

آقای دکتر مهدی بامداد

بهمن ۱۳۹۵



فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم نسترن نقیب زاده به شماره دانشجویی ۹۲۴۰۸۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش مکاترونیک تحت عنوان طراحی و تحلیل ربات کابلی فضایی برای یک عملیات ساخت در تعامل با اپراتور انسانی که در تاریخ ۹۵/۱۱/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه خوب) امتیاز (۱۷/۸۶) <input checked="" type="checkbox"/>	دفاع مجدد <input type="checkbox"/>	مردود <input type="checkbox"/>
نوع تحقیق نظری <input type="checkbox"/>	عملی <input type="checkbox"/>	

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)  
۲- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)  
۳- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)  
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۲ غیر قابل قبول

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	مهدی کاربassi	۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استاد	امیر موسوی شتراد	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	امیر موسوی	۵- استاد ممحن اول
	استاد	امیر موسوی	۶- استاد ممحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ

مادر م

آن نادرہ می، ہستی

و

برادر و خواہرم

دلکرمی و پناہ، ہمیشگی

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر بامداد که، همواره از وجود پر فیض ایشان بهره‌های علمی و

اخلاقی برده‌ام، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

امید که در نهایت سلامت و بهروزی، همواره راهگشای علمی آیندگان باشند.

## تعهد نامه

اینجانب **نسترن نقیب زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی و تحلیل ربات کابلی فضایی برای یک عملیات ساخت در تعامل با اپراتور انسانی** تحت راهنمایی دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 بافتهای آنها ) 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 افزار ها 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:

ربات های کابلی به عنوان دسته ربات انتخاب شده در این پژوهش دارای قابلیت های مهم صنعتی مانند سادگی، سبکی، ارزان قیمت بودن و حمل بار زیاد است. در این راستا تعامل بین ربات و اپراتور انسانی که ربات، وظیفه تحمل وزن و اپراتور وظیفه جهت دهی ابزار را بر عهده دارد مطالعه می گردد. در این پایان نامه ابتدا نیروهای وارد از ابزار به کابل ها بدون در نظر گرفتن نیروی عکس العمل فرآیند، محاسبه شده و سپس با اعمال نیرو و گشتاورهای عکس العمل فرآیند پولیشکاری از ابزار به روی ربات موازی کابلی، تأثیر برهمکنش ابزار و قطعه کار و ربات به صورت کامل نشان داده شده است. این بارگذاری با الگوریتم پیشنهادی به صورت تعامل پویا بین ابزار و انسان در نظر گرفته شده که در این بارگذاری، قطعه کار، نقش اغتشاش یا وارد کردن نیروی مزاحم و ابزار (ربات) و انسان، نقش اصلاح کننده مسیر و حفظ پایداری و تعادل مجموعه را ایفا می کنند. در انتها با توجه به نیروهای اعمال شده به مجری نهایی ربات، محرکه های کابلی طراحی شد.

**کلید واژه:** طراحی، ربات کابلی، فرآیند پولیشکاری، تعامل انسان و ربات

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه و تاریخچه	۱
۱-۱ مقدمه ای بر ربات های موازی	۲
۲-۱ ربات های موازی کابلی	۳
۳-۱ کاربرد ربات های کابلی	۵
۴-۱ پژوهش های پیشین با محوریت مدل سازی نیرو و فرآیند	۸
۵-۱ پژوهش های پیشین با محوریت ربات	۱۳
۶-۱ بیان مسئله	۱۹
۷-۱ نتیجه گیری	۲۰
فصل دوم: مدل سازی ربات سنگ زنی	۲۱
۱-۲ مقدمه	۲۲
۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه ای	۲۳
۱-۲-۲ شماتیک	۲۳
۲-۲-۲ سینماتیک-استاتیک وارون	۲۵
۳-۲-۲ سینماتیک-استاتیک مستقیم	۲۷
۴-۲-۲ دینامیک	۲۸
۳-۲ پارامترهای مؤثر در نیروی دینامیکی	۳۰
۴-۲ مدل سازی تغییرات دینامیکی عمق برش	۳۰
۵-۲ مدل سازی نیروی سنگ زنی	۳۲
۶-۲ اندازه گیری مقادیر آزمایشگاهی	۳۳



۳۳.....	نتایج.....	۷-۲
۳۴.....	نتیجه گیری و خاتمه.....	۸-۲
۳۵.....	فصل سوم: مدل فضایی و تعامل با اپراتور.....	
۳۶.....	مقدمه.....	۱-۳
۳۶.....	طراحی ربات کابلی فضایی در یک عملیات پولیشکاری.....	۲-۳
۳۷.....	ربات کابلی فضایی.....	۳-۳
۳۷.....	شماتیک.....	۱-۳-۳
۳۸.....	هندسه.....	۲-۳-۳
۴۰.....	حل مسئله سینماتیک - استاتیک وارون.....	۳-۳-۳
۴۳.....	دینامیک.....	۴-۳-۳
۴۵.....	عملیات پولیشکاری.....	۴-۳
۴۵.....	طراحی و فرضیات مدل سازی.....	۱-۴-۳
۴۶.....	مدل سازی دینامیکی.....	۲-۴-۳
۴۷.....	تعامل انسان و ربات.....	۳-۴-۳
۵۰.....	شبیه سازی.....	۵-۳
۷۱.....	نتایج شبیه سازی.....	۶-۳
۷۸.....	پایداری.....	۷-۳
۸۵.....	فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادها.....	
۸۶.....	نتیجه گیری.....	۱-۴
۸۷.....	ارائه پیشنهادها.....	۲-۴
۸۹.....	منابع.....	

پیوست ۱..... ۹۴

پیوست ۲..... ۹۷

## فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ ربات FALCON-7.....	۶
شکل ۲-۱ ربات کابلی نامقید روبروکرین.....	۷
شکل ۳-۱ بلوک دیاگرام سیستم کنترل نیروی تطبیق جابجایی قطب برای فرآیند سنگ کاری رباتیکی.....	۹
شکل ۴-۱ نیروهای محاسبه شده و پیش بینی شده.....	۱۰
شکل ۵-۱ نمایی از قطعه کار در سیستم مختصات کارتیزین.....	۱۱
شکل ۶-۱ مدل سیستم ابزار معلق.....	۱۴
شکل ۷-۱ طبقه بندی ربات‌های کابلی.....	۱۷
شکل ۸-۱ ربات کابلی صفحه‌ای.....	۱۸
شکل ۹-۱ نمای کلی ربات کابلی با قابلیت جابجایی خالص.....	۱۹
شکل ۱-۲ مقایسه مدل سازی تجربی و مدل سازی تحلیلی.....	۲۳
شکل ۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای.....	۲۴
شکل ۳-۲ ربات کابلی صفحه ای تحت بارگذاری و گشتاور خارجی.....	۲۹
شکل ۴-۲ مدل سنگ کاری دینامیکی برپایه عدم تعادل شفت.....	۳۱
شکل ۱-۳ ربات کابلی فضایی در تعامل با انسان در عملیات پولیشکاری.....	۳۷
شکل ۲-۳ ربات کابلی فضایی.....	۳۸
شکل ۳-۳ الگوریتم حل مسئله سینماتیک=استاتیک وارون برای ربات کابلی فضایی.....	۴۲
شکل ۴-۳ عملکرد انسان و ربات بر روی جسم.....	۴۸

- شکل ۳-۵ ربات کابلی فضایی تحت بارگذاری خارجی..... ۴۹
- شکل ۳-۶ بلوک دیاگرام سیستم..... ۵۰
- شکل ۳-۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک..... ۵۱
- شکل ۳-۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه  $Z-Y$ ..... ۵۲
- شکل ۳-۹ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۵۳
- شکل ۳-۱۰ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۵۴
- شکل ۳-۱۲ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه  $Z-Y$ ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۵۶
- شکل ۳-۱۶ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۵۶
- شکل ۳-۱۷ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۵۷
- شکل ۳-۱۸ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۵۷
- شکل ۳-۱۹ موقعیت مرکز صفحه متحرک..... ۵۸
- شکل ۳-۲۰ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه  $Z-Y$ ..... ۵۸
- شکل ۳-۲۱ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۵۹
- شکل ۳-۲۲ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۵۹
- شکل ۳-۲۳ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۰
- شکل ۳-۲۴ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۰
- شکل ۳-۲۵ موقعیت مرکز صفحه متحرک پس از اعمال نیرو..... ۶۱
- شکل ۳-۲۶ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه  $Z-Y$ ..... ۶۱

- شکل ۳-۲۷ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۶۲
- شکل ۳-۲۸ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۶۳
- شکل ۳-۲۹ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۳
- شکل ۳-۳۰ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۴
- شکل ۳-۳۱ موقعیت مرکز صفحه متحرک پس از اعمال نیرو..... ۶۴
- شکل ۳-۳۲ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y..... ۶۵
- شکل ۳-۳۳ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۶۶
- شکل ۳-۳۴ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۶۶
- شکل ۳-۳۵ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۷
- شکل ۳-۳۶ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۶۷
- شکل ۳-۳۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک پس از اعمال نیرو..... ۶۸
- شکل ۳-۳۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y..... ۶۸
- شکل ۳-۳۹ مقادیر کشش کابل‌ها..... ۶۹
- شکل ۳-۴۰ مقادیر زوایای صفحه متحرک..... ۷۰
- شکل ۳-۴۱ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۷۰
- شکل ۳-۴۲ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها..... ۷۱
- شکل ۳-۴۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان..... ۷۱
- شکل ۳-۴۴ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y..... ۷۲
- شکل ۳-۴۵ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان..... ۷۲
- شکل ۳-۴۶ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y..... ۷۳
- شکل ۳-۴۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان..... ۷۳
- شکل ۳-۴۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y..... ۷۴

- شکل ۳-۴۹ شتاب مرکز صفحه متحرک..... ۷۵
- شکل ۳-۵۰ سرعت مرکز صفحه متحرک..... ۷۵
- شکل ۳-۵۱ شتاب مرکز صفحه متحرک..... ۷۶
- شکل ۳-۵۲ سرعت مرکز صفحه متحرک..... ۷۶
- شکل ۳-۵۳ شتاب مرکز صفحه متحرک..... ۷۷
- شکل ۳-۵۴ سرعت مرکز صفحه متحرک..... ۷۷
- شکل ۳-۵۵ مقادیر کشش کابل ها..... ۷۹
- شکل ۳-۵۶ مقادیر کشش کابل ها..... ۷۹
- شکل ۳-۵۷ مقادیر کشش کابل ها..... ۸۰
- شکل ۳-۵۸ مقادیر کشش کابل ها..... ۸۱
- شکل ۳-۵۹ مقادیر کشش کابل ها..... ۸۲
- شکل ۳-۶۰ مقادیر کشش کابل ها..... ۸۲

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۴	جدول ۱-۱ مزایا و معایب ربات های سری و موازی.....
۳۳	جدول ۱-۲ پارامترهای آزمایشگاهی.....
۳۳	جدول ۲-۲ مقادیر نیروی آزمایشگاهی سنگ زنی.....
۵۲	جدول ۱-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی.....
۶۲	جدول ۲-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی.....
۶۵	جدول ۳-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی.....
۶۹	جدول ۴-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی.....





# فصل اول

## مقدمه و تاریخچه

## ۱-۱ مقدمه ای بر ربات های موازی

امروزه استفاده از ربات‌ها در بسیاری از کاربردهای صنعتی، پزشکی، نظامی و تفریحی در حال گسترش است. با توجه به نیاز روزافزون استفاده از ربات‌ها در بخش‌های مختلف، تحقیقات زیادی بر روی ربات‌ها در زمینه طراحی، مدل‌سازی دینامیکی، مدل‌سازی سینماتیکی، کنترل و تحلیل دقت صورت گرفته است. ربات‌های صنعتی می‌توانند در سینماتیک و حالت‌های دینامیکی مختلف ظاهر شوند. انواع بازوهای رباتی شش یا هفت درجه آزادی برای اغلب فعالیت‌های صنعتی استفاده می‌شوند. تحقیقات اخیر بیشتر در مورد ارتباط بین انسان‌ها و ربات‌ها در زمینه های صنعتی و آموزش مناسب برای این ارتباط هست. این ارتباط شامل برنامه‌ریزی آموزشی در جایگاه اپراتور، ربات را لمس می‌کند یا فشار می‌دهد است. در دهه‌های اخیر، ربات‌های توسعه‌یافته فوق‌العاده‌ای برای اهداف مختلف ساخته شده‌اند. با این حال کار کردن با ابزار صنعتی در صنایع ساخت سنگین مانند اتومبیل‌سازی، کشتی‌سازی و هواپیماسازی هنوز در مرحله ابتدایی خود قرار دارند زیرا استفاده از ربات با ابزار سنگین، به دلیل محدودیت گشتاورهای دستگاه اجرایی، امکان‌پذیر نیست. با رشد صنایع در کشورهای مختلف، بهره‌گیری از ربات‌ها نیز روزبه‌روز بیش‌تر رواج پیدا کرده، به ویژه در کاربردهایی که به دقت و سرعت بیش‌تری نیاز است. ربات‌ها بر اساس ساختار سینماتیکی، به دو دسته عمده سری و موازی تقسیم می‌شوند. در ربات‌های سری چندین لینک به صورت پشت سر هم به یکدیگر متصل می‌گردند. ربات‌های موازی بر پایه پلت فرم استوارت<sup>۱</sup> می‌باشند که در آن یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک به وسیله قطعاتی به یکدیگر متصل می‌شوند و کنترل صفحه متحرک، با کنترل همزمان عضوهای اتصال دهنده انجام می‌گیرد. در این بین ربات‌های ساختار موازی به دلیل دارا بودن دقت و ظرفیت حمل بار بیش‌تر و نیز امکان دسترسی به سرعت‌ها و شتاب‌های بالاتر نسبت به ربات‌های سری، در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری بوده‌اند. اما معایبی چون فضای کاری محدود و هزینه بالای ساخت، سبب شد تا در سال ۱۹۸۵ گونه جدیدی از این ربات‌ها به نام ربات‌های موازی

---

<sup>۱</sup> Stewart platform

کابلی<sup>۲</sup> معرفی شود که در مقایسه با ربات‌های موازی صلب از کابل‌ها و محرکه‌ها به جای لینک‌های صلب استفاده می‌شود. در این گونه از ربات‌ها، به دلیل آنکه کابل نسبتاً بلندی می‌تواند برای حرکت دادن پلت فرم مورد استفاده قرار گیرد، فضای کاری بزرگ‌تری نسبت به ربات‌های موازی کلاسیک در دسترس خواهد بود و نیز بار خمشی در لینک‌ها دیگر وجود نخواهد داشت.

## ۲-۱ ربات‌های موازی کابلی

ربات‌های موازی کابلی به دو بخش مقید و زیر مقید<sup>۳</sup> تقسیم بندی می‌شوند. در ربات‌های کابلی زیر مقید برای کنترل درجه آزادی ابزار نهایی، کشش کابل‌ها توسط یک نیروی منفعل شبیه به جاذبه صورت می‌گیرد که بسیار ضروری است درحالی‌که ربات‌های کابلی مقید می‌توانند تمام موقعیت‌هایی که تنها توسط نیروهای کابل به وجود می‌آید را کنترل کند. با توجه به خاصیت محرک غیر مستقیم کابل‌ها، تعادل استاتیکی یا دینامیکی باید به تحلیل فضای کاری ربات کابلی افزوده شود [۱ و ۲]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی طراحی و ساخت ربات‌های کابلی، قید کششی بودن نیروهای کابلی است؛ چرا که کابل‌ها تنها می‌توانند نیروی کششی را انتقال دهند و نمی‌توانند نیروی فشاری اعمال کنند. بنابراین در طراحی و محاسبه فضای کاری و همچنین کنترل این گونه ربات‌ها، این مسئله باید مورد توجه قرار گیرد. این کابل‌ها روی قرقره‌هایی پیچیده می‌شوند که در قاب ربات و روی شفت موتورها تعبیه شده‌اند. بدین ترتیب عملگرها بر روی قاب (پایه) نصب شده و ثابت‌اند و کابل‌های تحت کشش (که عموماً در قیاس با مجری نهایی جرم قابل توجهی ندارند) واسط عملگرها و جرم متحرک (مجری نهایی) هستند. ربات موازی کابلی، متشکل از یک مکانیزم موازی است که در آن مجری نهایی<sup>۴</sup> با کابل‌های تحت کشش به عملگرها متصل می‌شود. با تحریک این کابل‌ها می‌تواند حرکت پلت فرم و یا پیچ وارد بر آن را کنترل کرد. این نوع ربات موازی ویژگی‌های بسیاری دارد؛ از جمله:

<sup>۲</sup> Cable driven parallel robot (CDDR)

<sup>۳</sup> Underactuate

<sup>۴</sup> End-effector

۱. به طور بالقوه به فضای کاری بزرگی می‌تواند دسترسی پیدا کند؛ چون می‌تواند از کابل‌های بلند برای تحریک آن‌ها بهره برد.

۲. جرم کم قسمت متحرک ربات که بهره برداری از عملگرهای ضعیف‌تر را ممکن می‌کند.

۳. سبک‌تر شدن قسمت متحرک ربات، قابلیت دستیابی به سرعت/شتاب بالا را فراهم می‌آورد.

۴. نسبت به ربات‌های موازی کلاسیک، هزینه ساخت پایین‌تری دارد و....

برای آن‌که کابل‌ها در کل فضای کاری تحت کشش باشند باید حداقل از یک محرک بیش‌تر از تعداد درجات آزادی بهره برد و یا از یک نیروی منفعل استفاده کرد. اصول بنیادی ربات‌های کابلی بسیار ساده است اما اگر هدف، انجام کارهای متفاوتی از جمله جابه‌جایی سریع، نگه داشتن بار سنگین و یا انجام کاری دقیق باشد، به چالش‌ها افزوده می‌شود. برای حل این چالش‌ها، از جمله طراحی و کنترل ربات‌ها به ریاضیات احتیاج داریم. به طور خلاصه فضای کاری ربات‌های کابلی به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. فضای کاری چرخش امکان پذیر

۲. فضای کاری استاتیکی

۳. فضای کاری دینامیکی

۴. فضای کاری کنترل پذیر

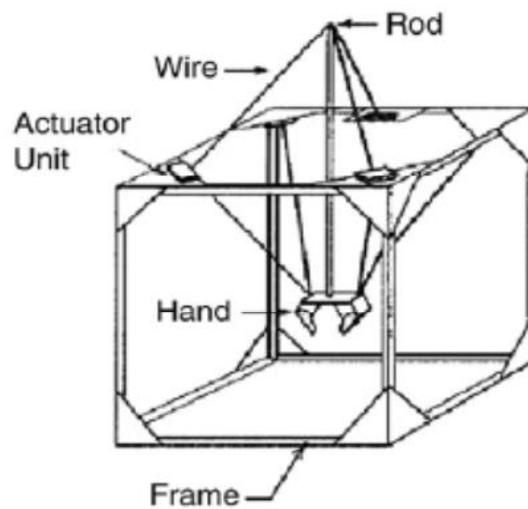
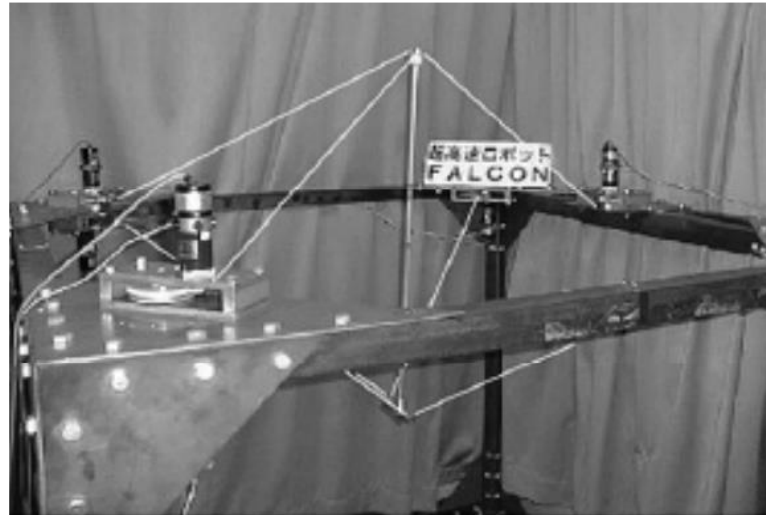
از جمله قیودی که در هنگام طراحی هر ربات باید در نظر گرفت، دقت و مهارت آن ربات در انجام وظایف محوله است. تعیین فضای کاری که دقت ربات، حداقل‌های تعیین شده را رعایت می‌کند و سعی در افزایش این فضا، بخشی از طراحی یک ربات ایده آل به شمار می‌آید [۳ و ۴]. ربات‌های کابلی یک نوع از بازوهای رباتی موازی است که ابزار، توسط  $n$  کابل و  $n$  موتور هدایت می‌شود. چالش اصلی در تحقیق درباره ربات‌های زیر مقید، ارتباط تنگاتنگ بین سینماتیک و استاتیک می‌باشد. برای یک ربات موازی کابلی کاملاً مقید که در محدوده مجاز فضای کاری عمل می‌کند، با مشخص بودن طول کابل‌ها، با استفاده از یک روش هندسی منحصر به فرد، موقعیت قسمت انتهایی تعیین می‌شود.

برعکس برای یک ربات موازی کابلی زیر مقید، در حالتی که موتورهای ثابت هستند و طول کابل‌ها مشخص است، قسمت انتهایی هنوز قابلیت تحرک دارد، بنابراین آرایش ربات به مقدار نیروی خارجی اعمالی بستگی دارد. به عنوان یک نتیجه برای ربات موازی کابلی زیر مقید، موقعیت انتهایی، هم به طول کابل‌ها و هم به معادلات تعادل بستگی دارد. سروکار داشتن با سینماتیک و استاتیک به طور همزمان پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهد که هدف، تعیین پیکربندی کلی ربات با مشخص بودن  $n$  متغیر می‌باشد. راه حل این مسائل برای ربات موازی کابلی زیر مقید، هنگامی که وظیفه مشخصه یکی می‌باشد، به طور قابل توجهی سخت‌تر از مدل با دارا بودن محرک‌های صلب است. به همین دلیل، اغلب مطالعات صورت گرفته درباره ربات موازی کابلی زیر مقید، کاملاً بر راه‌حل‌های عددی موضعی تکیه می‌کنند. در مراجع [۵۶] برای تحلیل سینماتیک، استاتیک و پایداری یک ربات موازی کابلی زیر مقید، یک متد اصلی برای ربات موازی که در آن صفحه متحرک توسط  $n$  کابل به صفحه ثابت متصل است پیشنهاد داده شده است، که در آن  $n \leq 5$  و نقاط مرجع بر روی صفحه متحرک و صفحه ثابت مجزا می‌باشند.

### ۳-۱ کاربرد ربات‌های کابلی

ربات‌های کابلی کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند که برای نشان دادن اهمیت آن‌ها به اختصار به چند نمونه اشاره می‌شود. لازم به ذکر است طیف کاری ربات‌های کابلی بسیار گسترده است و می‌توان به راحتی نمونه‌های بسیار بیشتری از آنچه در این پروژه به آن اشاره شده یافت. شکل ۱-۱ ربات FALCON-7 را نشان می‌دهد که یک ربات کابلی کاملاً مقید با هفت کابل نسبتاً کوچک است و می‌تواند به شتابی برابر  $43g$  دست یابد. اگرچه، این بازوها در فضای کاری کوچک عملی هستند زیرا هندسه مورد نیاز برای کابل‌ها و سازه ربات به منظور کار در فضاهای بزرگ طراحی نشده‌اند.

به طور مثال، بکار بردن FALCON-7 در مقیاس بزرگ به میله بسیار بزرگ و مزاحم نیاز دارد. ربات‌های کابلی نامقید همان‌طور که اشاره شد ارائه شده‌اند تا در حرکت‌های منحنی وار بکار روند. اگرچه در مواردی که نیاز به کنترل در فضای کاری گسترده با سختی و دقت بالا دارند استفاده از ربات کاملاً مقید توصیه می‌شود.

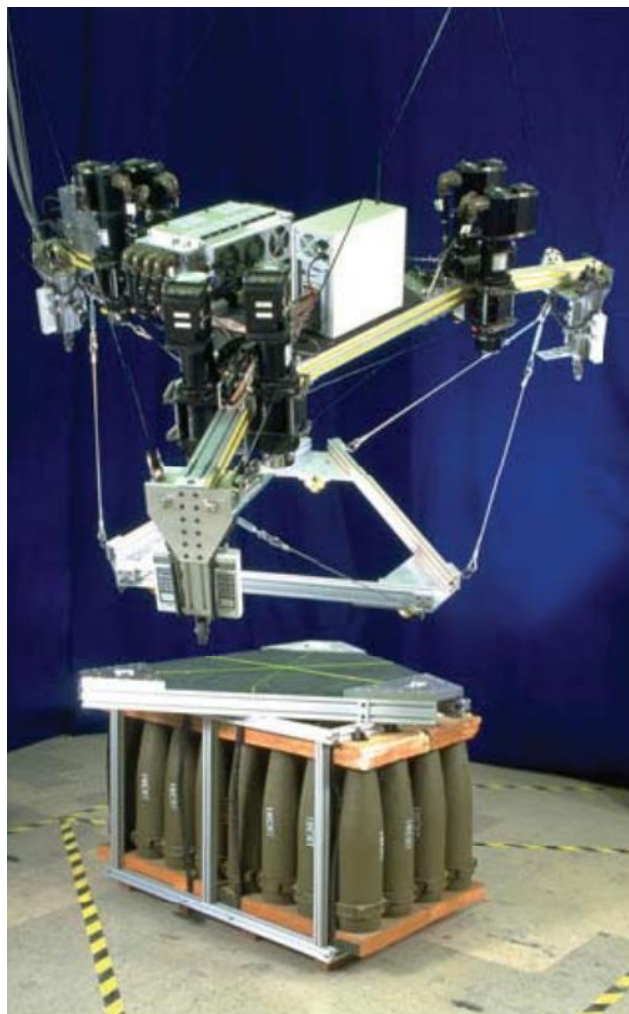


شکل ۱-۱ ربات FALCON-7 [۷]

روبوکرین<sup>۵</sup> نیز نام یک ربات نامقید است که توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا طراحی شده است. شکل ۲-۱ ربات کابلی روبوکرین را برای کاربرد بلند کردن اجسام نشان می‌دهد.

<sup>5</sup> Robocrane

<sup>6</sup> NIST: National Institute of Standards and Technology



شکل ۱-۲ ربات کابلی نامقید روبروکرین [۸]

به عنوان نمونه همین دو مثال برای نشان دادن کاربرد ربات کابلی کفایت می‌کند. اگرچه این ربات‌ها هم به صورت کاملاً مقید و هم به صورت زیر مقید (نامقید) در صنایع مختلف ماشین سازی، هواپیما، هوافضا و .... کاربرد گسترده‌ای دارند.

با توجه به اهمیت موضوع و بار اقتصادی بالای صنایع پولیشکاری، در این پایان نامه، ربات پولیشکاری را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به کاربردی بودن این مبحث، کارهای مختلفی روی این مسئله صورت گرفته است که در ادامه به اختصار به تعدادی از آنها پرداخته می‌شود.

## ۴-۱ پژوهش‌های پیشین با محوریت مدل‌سازی نیرو و فرآیند

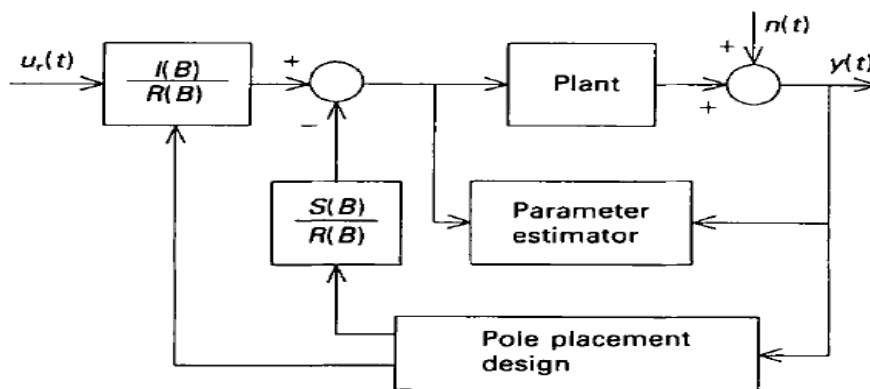
بر اساس تحقیقات انجام‌شده دو جنبه اصلی فرآیند سنگ زنی رباتیکی صلب، سطح دیسک و نیروی سنگ زنی است. بزرگ‌ترین غیر یکنواختی سطح دیسک در گوشه‌های خارجی دیسک مشاهده می‌شود [۹]. بر اساس [۹] یک مدل سطح ساده با فرض اینکه سطح می‌تواند مانند یک مثلث، برش خورده شود به دست می‌آید. مدل بهبود یافته نیروی سنگ زنی دینامیکی شامل اثرات سطح دیسک و سختی غیر خطی سیستم ربات است. در سال ۱۹۹۲ آزمایش‌ها بر روی یک سیستم سنگ زنی رباتیکی واقعی جهت بررسی صحت این مدل انجام شده است [۹]. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در مرجع [۹]، بسیار دلگرم‌کننده می‌باشد چرا که مدل نیروی سنگ زنی، خطاهای ردیابی را بهبود می‌بخشد لذا توجه شده که اگر سنگ کاری رباتیکی برای مقادیر بزرگی طراحی شده باشد، سطح دیسک از جنبه‌های مهم این طراحی به شمار می‌آید که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. لعاب سریع دیسک سنگ کاری، یک مشکل مهم در طول این فرآیند است از این رو [۹] پیشنهاد کرده تحقیقات بیشتری برای درک بهتر روند سایش در این زمینه مورد نیاز است. در مرجع [۹] مقایسه بین نیروی سنگ زنی واقعی و نیروی شبیه سازی شده نشان می‌دهد که شبیه سازی، نیروهای سنگ زنی را بسیار نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی آن پیش بینی می‌کند.

در ادامه این کار، مدل‌سازی و کنترل نیروی تراش برای فرآیند سنگ‌زنی در سال ۱۹۹۳ توسط محققان [۱۰] توصیف شد. در این کار آزمایش‌های مدل‌سازی با استفاده از یک ربات صنعتی با یک چرخ سنگ‌زنی پنوماتیک و یک حس‌گر نیرو انجام شده است. مدل‌های مربوط به نیروی نرمال بر اساس تعدادی از مقادیر آزمایشگاهی به دست آمد. این مقادیر در سه مسیر مختلف تراشکاری با سه دامنه مختلف برای بررسی کامل دینامیک‌های فرآیند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات، پارامترهای بازگشتی برای فرآیند سنگ‌زنی دیسک رباتیکی تخمین زده شده است. با استفاده از این مدل، مکان‌های قطب‌های کنترل‌گر با استفاده از یک مدل



کامپیوتری، شبیه سازی و تست شده که کار اصلی کنترل گر طراحی شده، تنظیم نیروی نرمال برای برش می باشد.

نتایج، کنترل مؤثر قیود سنگ زنی مختلف را نشان می دهد و مقایسه ای بر روی این مدل و مدل های انجام شده پیشین، صورت گرفته است. بنابراین یک مدل خطی ARMAX از درجه ۴، جهت بهبود فرآیند تراشکاری رباتیکی، بسیار موفقیت آمیز می باشد. نتایج شبیه سازی، کفایت مدل مورد نظر را برای فرآیند سنگ زنی رباتیکی تحت قیود سنگ زنی مختلف، تصدیق می کند. اجرای کنترل گر در این تحقیق، رضایت بخش بوده است. یک روش طراحی عمومی برای چنین سیستمی، طراحی جابجایی قطب<sup>۷</sup> می باشد که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ بلوک دیاگرام سیستم کنترل نیروی تطبیق جابجایی قطب برای فرآیند سنگ زنی رباتیکی [۱۰]

دو مدل کامپیوتری در سال ۲۰۰۰ توسط بدگر و تورانس<sup>۸</sup> [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت که می توانست برای پیش بینی نیروها در سنگ زنی و برای محاسبه نمودارهای سنگ زنی تئوری مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه ها بین نیروهای پیش بینی شده از هر مدل و نیروهای محاسبه شده از آزمایش های سنگ زنی صورت گرفت که مدل اول بر اساس تئوری مدل دو بعدی چالن و اُکسلی<sup>۹</sup> [۱۲] و مدل سه بعدی ویلیام<sup>۱۰</sup> [۱۳] انجام شده است. در هر دو روش، قطعه کار مانند یک جسم پلاستیکی صلب در نظر گرفته شده است و ورودی ها برای هر مدل، نوع ماده قطعه کار است. این

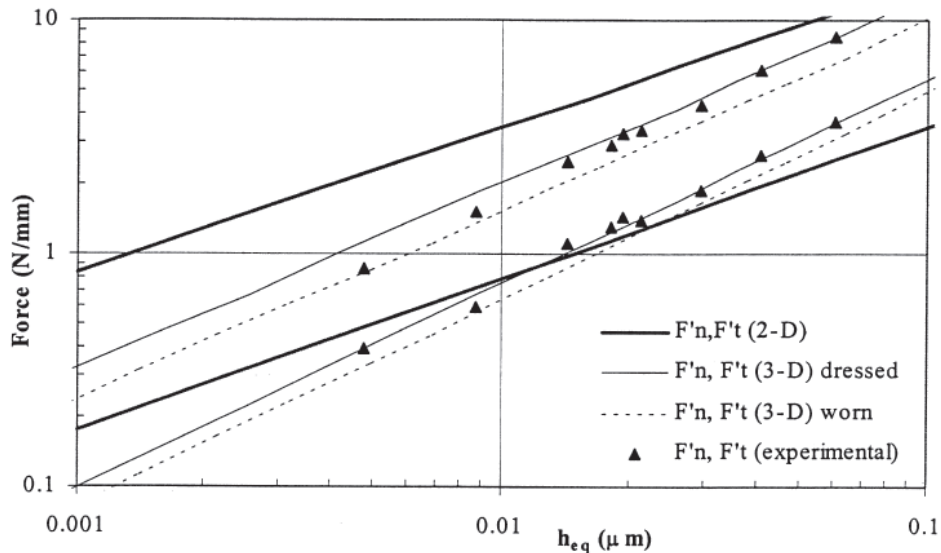
<sup>7</sup> Pole Placement Design

<sup>8</sup> Badger & Torrance

<sup>9</sup> Challen & Oxley

<sup>10</sup> William

نیروهای تئوری و نیروهای آزمایشی محاسبه شده از سنگزنی EN31<sup>۱۱</sup> بعد از یک پوشش دهی خوب در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نیروهای محاسبه شده و پیش بینی شده [۱۱]

که  $h_{eq}$  ضخامت بخش برش خورده روی قطعه کار است. نتیجه مقایسه بین این نیروها تطبیق بسیار خوب نتایج مدل و آزمایش را نشان می‌دهد. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که مدل سه بعدی دقت بیشتری نسبت به مدل دو بعدی دارد. مقایسه بین نیروهای پیش بینی شده و آزمایشگاهی در شکل ۴-۱ برای مدل سه بعدی بسیار عالی است.

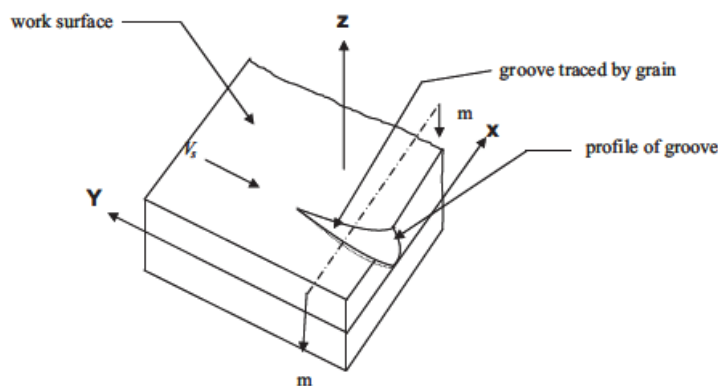
آگاروال و همکارش<sup>۱۲</sup> در مرجع [۱۴] مدل سازی پیش بینی شده نیرو و توان در سنگزنی سرامیکی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند نیرو و توان سنگزنی نقش مهمی در فرآیند سنگزنی سرامیکی دارد و این تنها به این خاطر نیست که بر روی سطح چرخ، دقت سنگزنی و دمای آن تأثیر دارند بلکه بر روی تغییر شکل در نقطه تماس که خود اثر مهمی بر مکانیزم براده برداری مواد دارد نیز اثر می‌گذارند. به علاوه این دو فاکتور، برای تخمین فرآیند سنگزنی سرامیکی فاکتورهای مانیتورینگ<sup>۱۳</sup> و کنترل، اهمیت بسیاری دارند بنابراین پیش بینی نیرو و توان سنگزنی در فرآیند سنگزنی

<sup>۱۱</sup> یک استیل آلیاژی با کربن بالا که مقاومت و سختی بسیار مناسبی دارد.

<sup>۱۲</sup> Agarwal & Venkateswara Rao

<sup>۱۳</sup> monitoring

سرامیکی مؤثر است. در این تحقیق، یک مدل نیرو و توان سنگ‌زنی جدید برای پیش بینی قابل اطمینان این دو فاکتور در سنگ‌زنی سرامیکی بر اساس یک تحلیل جدید از مدل ضخامت تراشه تغییر ناپذیر، ارائه می‌شود. شکل ۱-۵ شماتیکی از عکس العمل نوک ابزار بر روی قطعه کار نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵ نمایی از قطعه کار در سیستم مختصات کارترین [۱۴]

کیانگ لیو<sup>۱۴</sup> و همکارانش [۱۵] یک مدل‌سازی تجربی نیروی سنگ‌زنی بر اساس تحلیل چند متغیره در سال ۲۰۰۸ ارائه دادند. بر اساس سه فاکتور مهم در مدل‌سازی تجربی یعنی طراحی آزمایش، پیدا کردن مقادیر و رگرسیون و اینکه نیروی موجود در طی فرآیند سنگ‌زنی، یک فاکتور کلیدی مؤثر برای کیفیت سنگ‌زنی و طراحی اجزای سنگ زن می‌باشد کار آن‌ها صورت گرفت. نتایج به دست آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که فیلتر موجک<sup>۱۵</sup>، دقت بهتری را ارائه می‌دهد.

در یک کار دیگر مدل‌سازی و مطالعه آزمایشگاهی نیروهای سنگ‌زنی توسط محققان [۱۶] در سال ۲۰۰۹ مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله نیروهای سنگ‌زنی، مرکب از نیروی تغییر شکل تراشه و نیروی متغیر در نظر گرفته شده و یک مدل ریاضی جدید از این نیرو در سنگ‌زنی سطح قطعه کار مورد مطالعه قرار گرفته شد. انرژی تغییر شکل تراشه به انرژی تغییر شکل استاتیکی و دینامیکی تقسیم بندی شدند بنابراین فرمول بندی برای محاسبه نیروی تغییر شکل تراشه توسط تحلیل روابط

<sup>14</sup> Qiang Liu

<sup>15</sup> wavelet filter

بین انرژی و نیروی تغییر شکل، صورت پذیرفت. آن‌ها اثرات این مدل را توسط مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی مدل، بررسی کردند. نتایج شبیه سازی و محاسبات به هر لحاظ مناسب با اندازه گیری آزمایشگاهی می‌باشد که این آزمایش، صحت و مؤثر بودن مدل نیروی سنگ‌زنی مورد نظر را تأیید می‌کند.

تحلیل دینامیکی فرآیند سنگ‌زنی برای کاهش لرزش و زبری سطح توسط محققان [۱۷] انجام شده است. این مقاله توابع دینامیکی فرآیند سنگ‌زنی را نشان می‌دهد و یک روش برای نشان دادن فاکتورهای برش در سنگ‌زنی دینامیکی را مورد بررسی و مطالعه قرار داده و به مکانیزم سنگ‌زنی دینامیکی از نقطه نظر سینماتیک توجه شده است. در این پژوهش رابطه بین نیروی سنگ‌زنی و فرکانس لرزش مشخص شده و مقایسه بین تابع تبدیل تئوری سنگ‌زنی دینامیکی و نمونه آزمایشگاهی آن، تطبیق خوبی را نشان می‌دهد.

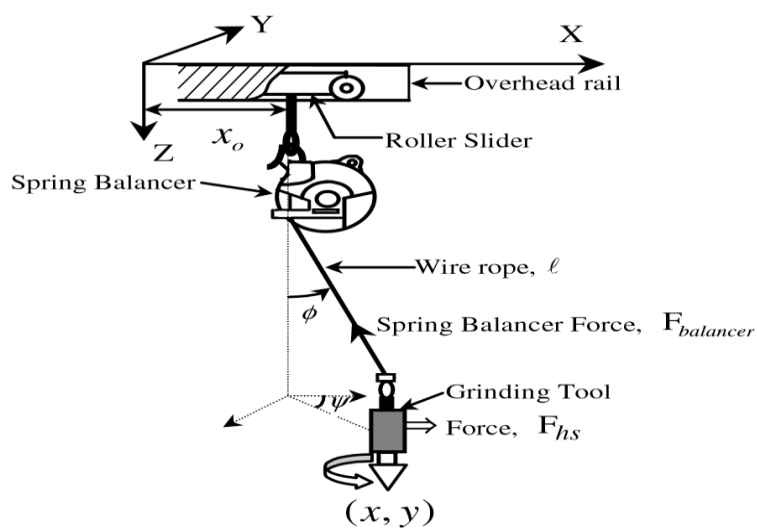
در سال ۲۰۱۵ مدل نیرو برای سنگ‌زنی با یک نگه‌دارنده ابزار رباطیکی انعطاف پذیر توسط امیر مسعود تحویلین و دیگر همکارانش [۱۸] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها معتقد بودند سنگ‌زنی مانند یک فرآیند پرداخت در زنجیره تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، فرآیند سنگ‌زنی با یک ربات انعطاف پذیر مانند یک نگه‌دارنده ابزار انجام گرفته شد. به پیشنهاد آن‌ها در یک فرآیند سنگ‌زنی رباطیکی داشتن یک مدل دقیق برای پیش بینی نیروی فرآیند در به دست آوردن نسبت براده برداری مواد از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مقاله یک مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده است که مدل نیرویی را تحلیل می‌کند که به صورت مؤثر براده برداری را انجام می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات در پارامترهای مدل می‌تواند برای پیش بینی بهتر نیرو، قدرت و عمق برش فرآیند مفید باشد.

## ۵-۱ پژوهش‌های پیشین با محوریت ربات

با توجه به رشد سریع صنایع و سیستم‌های تعامل گرا، جایگزینی ربات و سیستم‌های اتوماتیک بجای اپراتور انسانی امری واضح به نظر می‌رسد. پرداختن به این سیستم‌ها و تلاش جهت بهبود تعامل انسان-ماشین رو به افزایش است. نقش این تعامل در روند طراحی و تبدیل شدن به طراحی تعامل گرا در ربات‌ها به روشنی دیده می‌شود. این سامانه‌ها به ارتقای زمان، ایمنی و کارآیی در کارخانه‌های تولیدی کمک می‌کند. مشاهده ربات‌های سریع در این نوع کارخانه‌ها معمول است ولی به دلیل مسائل ایمنی، انسان‌ها به ندرت در مجاورت آن‌ها کار می‌کنند؛ با این حال هنوز تعدادی از مشاغل، همکاری مشترک و نزدیک انسان‌ها و ربات‌ها را می‌طلبند. دسته ربات انتخاب شده در این پژوهش دارای قابلیت‌های مهم صنعتی مانند سادگی، سبکی، ارزان قیمت بودن و حمل بار زیاد است [۱۹]. در این راستا در تحقیق حاضر، تعامل بین ربات و اپراتور انسانی که ربات، وظیفه تحمل وزن و اپراتور وظیفه جهت دهی ابزار را بر عهده دارد مطالعه می‌گردد. این ایده در فرآیندهای ساخت بسیار کارا به نظر می‌رسد. به منظور آماده سازی شرایط استفاده از ربات‌ها در صنایع سنگین تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. به عنوان نمونه استفاده از یک سیستم تعلیق شامل بالانسر فنری که ابزار را توسط نیروی بالا برنده خود، معلق نگه می‌دارد برای طرح پیشنهادی توصیه می‌شود [۲۰]. این نیروی بالا برنده که با نیروی گرانش ابزار برابر است، می‌تواند به راحتی با یک پیچ تنظیم کننده به صورت دستی تنظیم شده و روی یک مسیر مشخص مانند سیستم موقعیت دهی عمل کند. سیستم ابزار معلق، مزایای بسیاری نسبت به سیستم‌های بار مستقیم دارد. سیستم‌های ابزار معلق<sup>۱۶</sup>، اصطکاک ناشی از بازوی رباتی را کاهش می‌دهد. این سیستم در جاهایی که احتیاج به دریل کردن، تراشیدن و غیره دارند بسیار مؤثر است. سیستم ابزار معلق می‌تواند نیروی گرانشی ابزار را جبران کند. نمونه ای از مکانیزم تعلیق پیشنهادی در شکل ۱-۹ نشان داده شده است:

---

<sup>16</sup> Suspended tool systems



شکل ۱-۶ مدل سیستم ابزار معلق [۲۰]

مزایا و معایب ربات های سری و موازی در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱ مزایا و معایب ربات های سری و موازی

معایب	مزایا	نوع ربات
صلبیت کم دقت پایین فضای کاری کوچک	سرعت بالا پوشش زوایای مختلف	سری
عدم پوشش بازه های زاویه ای بزرگ سرعت کم	پایداری قابلیت حمل بار زیاد دقت بالا	موازی
پایداری کم عدم امکان کنترل موقعیت و زاویه قسمت انتهایی به طور همزمان	صلبیت کم هزینه ساخت و تعمیرات کم و سبکی قابلیت حمل بار زیاد دقت بالا فضای کاری وسیع	موازی کابلی

ربات‌های موازی شامل یک پلت فرم ثابت و یک پلت فرم متحرک می‌باشند که به وسیله عضوهایی به یکدیگر متصل می‌شوند. اعضای استفاده شده در اتصال پلت فرم ثابت و پلت فرم متحرک می‌توانند پیستون‌های خطی یا کابل باشند. طرح یک ربات موازی کابلی با مزایای ذکر شده در جدول ۱-۱ پیشنهاد می‌شود. ربات‌های کابلی بر پایه ایده اصلی پلت فرم استوارت اولین بار توسط Albus در سال ۱۹۸۸ در NIST ارائه شد [۲۱] که در آن، کابل‌ها جایگزین لینک‌ها شدند و از موتورهای دوار به عنوان محرکه استفاده گردید و هدف از ابداع آن امکان کنترل دقیق بار برای انجام عملیات بازرسی سطوح، جابجایی و مختصات دهی دقیق در فضای کاری وسیع بود که این امکان در جرثقیل‌های قدیمی وجود نداشت. طبق توضیح داده شده در فصل یک از این دسته ربات‌ها، ربات‌های کابلی پرکاربردتر و عملی‌تر محسوب می‌شوند. با توجه به این موضوع، ما نیز کل تمرکز خود را بر ربات‌های کابلی و پژوهش‌های مرتبط با آن‌ها گذاشتیم.

برای ربات‌های کابلی، طبقه بندی‌های متفاوتی بر پایه تفاضل بین تعداد کابل‌ها ( $m$ ) و تعداد درجات آزادی سیستم ( $n$ ) بیان شده است که تفاوت این دو، افزونگی نامیده می‌شود ( $r=m-n$ ).

بر طبق طبقه بندی مینگ و هیگوچی [۲۲] در سال ۱۹۹۴ ربات‌ها می‌توانند بر پایه این افزونگی به صورت زیر، طبقه بندی شوند:

<sup>۱۷</sup> CRPM: وضعیت ربات در این حالت به این صورت است که توسط قیود سینماتیکی تک محوری تعریف شده به وسیله کابل‌های کشیده شده کاملاً معین گردیده است. برای این مورد باید تعداد کابل‌ها حداقل یکی بیشتر از تعداد درجات آزادی سیستم باشد ( $m=n+1$ ).

<sup>۱۸</sup> IRPM: در این حالت علاوه بر قیود تعریف شده توسط کابل‌های کشیده شده، باید حداقل یک معادله دینامیکی برای توصیف وضعیت مجری نهایی موجود باشد.

در سال ۲۰۰۴ گروه بندی CRPM توسط ورهون<sup>۱۹</sup> به دو زیر گروه دیگر صورت گرفت. یکی گروه CRPMs که محدود شده به ربات‌های کابلی با رابطه  $m=n+1$  می‌باشد و دیگری <sup>۲۰</sup> RRPM که

<sup>17</sup> Completely Restrained Parallel Manipulator

<sup>18</sup> Incompletely Restrained Parallel Manipulator

رابطه بین کابل‌ها و درجات آزادی به صورت  $m > n + 1$  برقرار است. سپس گروه بندی دیگری بر اساس تعداد درجات آزادی کنترل شده انجام گرفت که به صورت زیر می‌باشد:

1T: حرکت خطی یک نقطه

2T: حرکت صفحه ای یک نقطه

3T: حرکت فضایی یک نقطه

1R2T: حرکت صفحه ای جسم

2R3T: حرکت فضایی یک میله

3R3T: حرکت فضایی یک جسم

که T بیان کننده درجه آزادی جابجایی و R درجه آزادی چرخشی می‌باشد. قابل ذکر است که این گروه بندی، تمامی انواع ربات‌های کابلی را تحت پوشش قرار می‌دهد.

در سال ۲۰۰۵ نیز فنگ<sup>۲۱</sup> گروه بندی خود را بر اساس عملکرد ورهوون انجام داد و سه گروه را به صورت زیر بیان کرد:

$m < n$  : به طوری که  $IKRM^{22}$

$m = n$  : به طوری که  $CKRM^{23}$

$m \geq n + 1$  : به طوری که  $RAMP^{24}$

برای اینکه تمامی کابل‌ها تحت کشش باشند باید حداقل از یک محرک کابلی افزون بر درجات آزادی سیستم استفاده کرد و یا یک نیروی منفعل مانند جاذبه را به سیستم اعمال کرد.

<sup>19</sup> Verhoeven

<sup>20</sup> Redundantly Restrained Parallel Manipulator

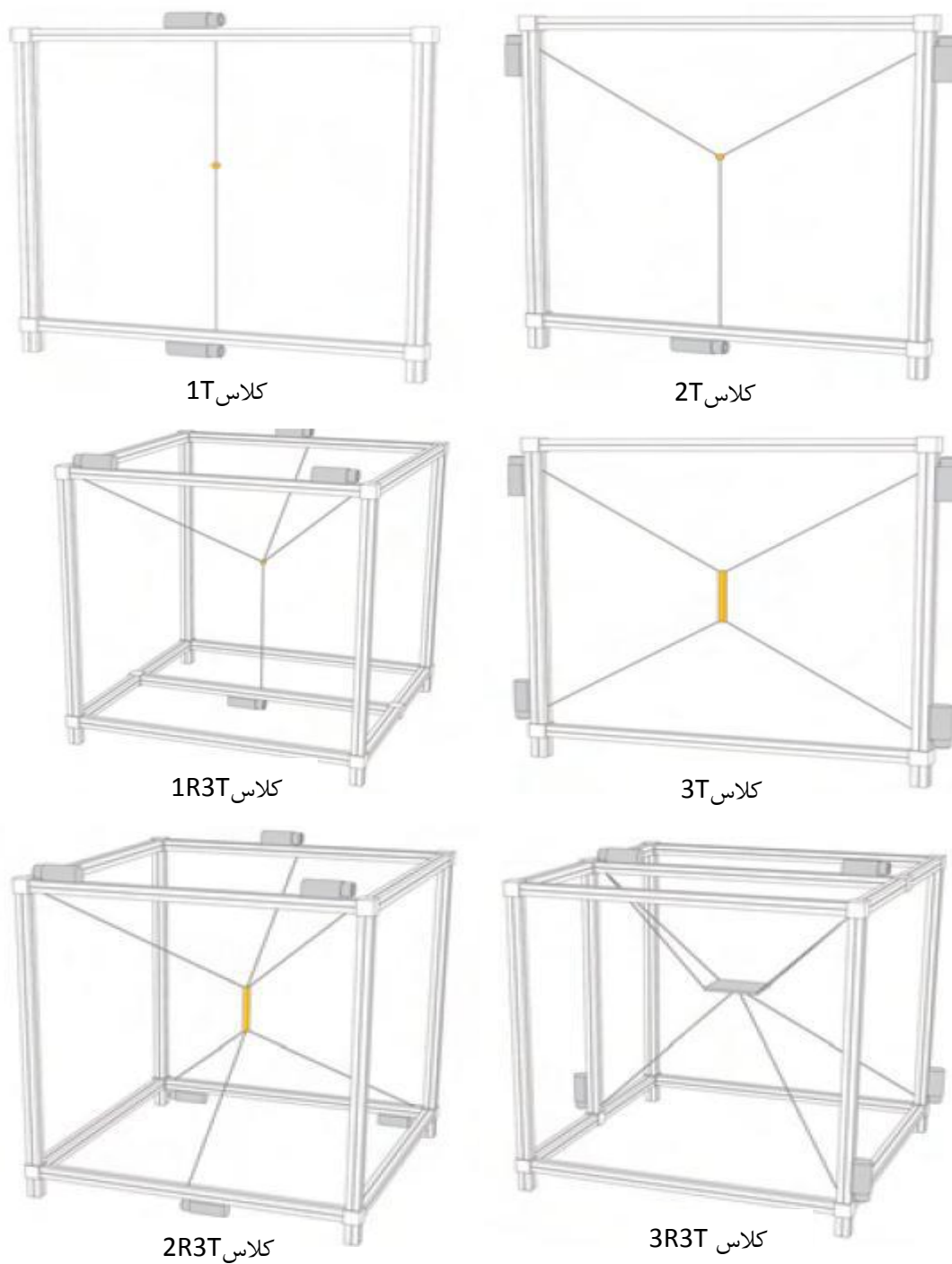
<sup>21</sup> Fang

<sup>22</sup> Incompletely Kinematic Restrained Manipulator

<sup>23</sup> completely Kinematic Restrained Manipulator

<sup>24</sup> Redundantly Actuated Manipulator



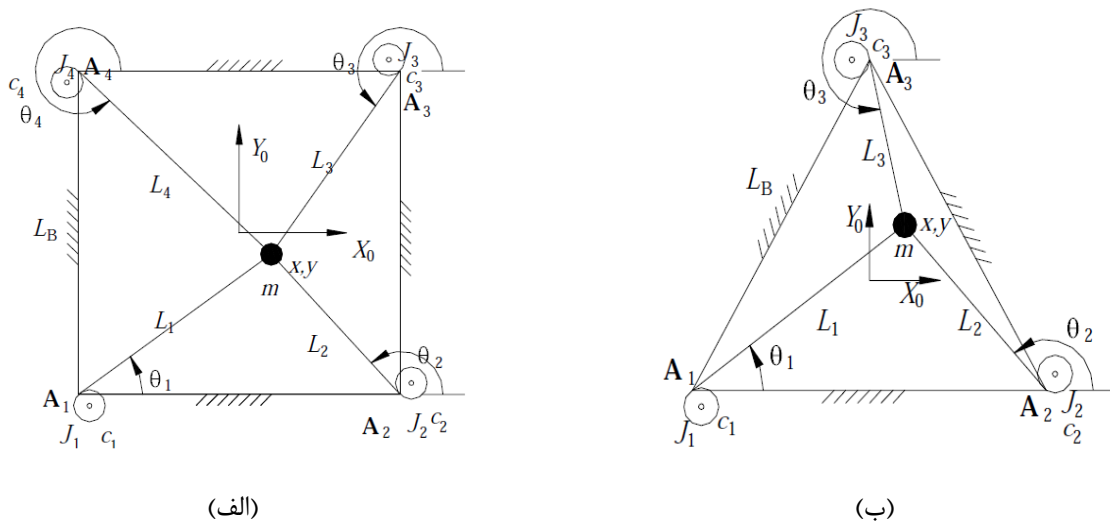


شکل ۱-۷ طبقه بندی ربات‌های کابلی [۲۲]

رابرت ویلیام و پائولو گالینا<sup>۲۵</sup> [۲۳]، مدل دینامیکی و کنترل شبیه سازی شده برای ربات‌های کابلی صفحه ای و مقایسه دو ربات ۳ کابلی و ۴ کابلی به ترتیب یک و دو درجه تحریک افزودنی را مورد بررسی قرار داده‌اند. با وجود تحریک افزودنی، زیر فضاهای کاری بالقوه وجود دارد که در آن برخی

<sup>25</sup> Robert L. Williams & Paolo Gallina

کابل‌ها می‌توانند تنش از دست بدهند. این مسئله می‌تواند توسط دینامیک های ربات‌های کابلی تحریک مستقیم، تشدید شود. بر این اساس در این تحقیق دینامیک‌ها و کنترل ربات‌های کابلی صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. تأکید این مقاله بر روی موقعیت جابجایی و نیروها می‌باشد. در ابتدا فرم استاندارد سیستم های رباتیکی به دست آورده شده است. همچنین ساختار کنترلی متشکل از سه قسمت مجزا؛ کنترل کننده PD، ترم بازخورد مستقیم<sup>۲۶</sup> و ورودی مختصات نیرو برای محاسبه گشتاور عملگرها شبیه سازی شده و نتیجه گرفته می‌شود که خطای ردیابی در ربات‌های کابلی صفحه‌ای چهار کابلی، بیشتر از ربات‌های کابلی صفحه‌ای سه کابلی می‌باشد. در هر دو آن‌ها تنش کابل، با توجه به دینامیک‌ها در محدوده کوچکی از حرکت با وجود حداقل کنترل تنش بر روی هر کابل، منفی می‌شود. از مقایسه خروجی شبیه سازی شده، ثابت می‌شود کنترل کننده با وجود ترم بازخورد مستقیم برتر از کنترل کننده بدون بازخورد مستقیم برای هر دو ربات‌های کابلی صفحه‌ای ۳ کابلی و ۴ کابلی است که مدل پیشنهاد شده آن‌ها در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است.

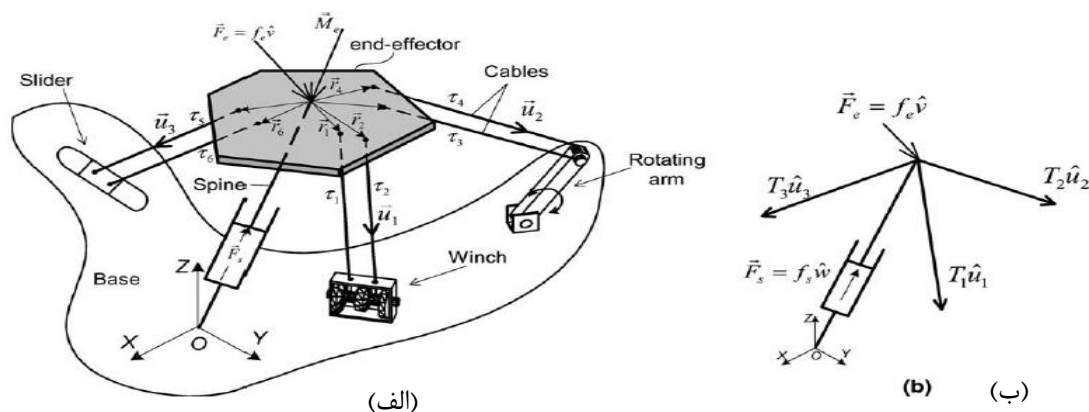


شکل ۱-۸ ربات کابلی صفحه‌ای (الف). ۴ کابلی (ب). ۳ کابلی [۲۳]

با توجه به آنکه در ربات‌های کابلی یک جزء تلسکوپی برای بکار بردن نیرو در ابزار، جهت حفظ تنش در همه کابل‌ها استفاده می‌شود، تنش های کابلی یا نیروهای داخلی در روند طراحی، پیچیده‌تر از

<sup>26</sup> Feedforward

روند طراحی ربات‌ها با لینک‌های صلب است. مدل‌سازی و کنترل ربات کابلی با کابل‌های الاستیک، طبق روش اوپلر-لاگرانژ<sup>۲۷</sup> در مرجع [۲۴] مورد بررسی قرار گرفته است و پایداری سیستم حلقه بسته از طریق تحلیل کنترل لیاپانوف<sup>۲۸</sup> به روش دوم، انجام شده است. در نهایت با مدل‌سازی کنترل کننده در یک مورد عملی مورد آزمایش صحت آن تأیید شد. معرفی یک روش هندسی برای مطالعه این مسئله در مرجع [۲۵] ارائه شده است. بسیاری از کاربردهای رباتیکی در ساخت و ساز و صنعت، نیازمند اندازه‌گیری موقعیت نهایی، ابزار و مواد است. در این تحقیق، مدل ارائه شده دارای یک فنر با نیروی ثابت می‌باشد که تنش در همه کابل‌ها را حفظ می‌کند و در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۹ (الف) نمای کلی ربات کابلی با قابلیت جابجایی خالص (ب) تعادل نیروی ابزار نهایی [۲۵]

## ۶-۱ بیان مسئله

با توجه به مطالب ارائه شده و کاربردهای گسترده ربات‌های کابلی، رشد سیستم‌های تعامل گرا و جایگزینی آن‌ها بجای اپراتور انسانی امری واضح به نظر می‌رسد. پرداختن به این سیستم‌ها و تلاش جهت بهبود تعامل انسان-ماشین رو به افزایش است. نقش این تعامل در روند طراحی و تبدیل شدن به طراحی تعامل گرا در ربات‌ها به روشنی دیده می‌شود. این سامانه‌ها به ارتقای زمان، ایمنی و کارایی در کارخانه‌های تولیدی کمک می‌کند. مشاهده ربات‌های سریع در این نوع کارخانه‌ها معمول

<sup>27</sup> Euler- Lagrange method

<sup>28</sup> Lyapunov control analys

است ولی به دلیل مسائل ایمنی، انسان‌ها به ندرت در مجاورت آن‌ها کار می‌کنند؛ با این حال، تعدادی از مشاغل حساس همکاری مشترک و نزدیک انسان‌ها و ربات‌ها را می‌طلبند.

همان‌طور که دیده شد دسته ربات (ربات کابلی موازی) انتخاب شده در این پژوهش دارای قابلیت‌های مهم صنعتی مانند سادگی، سبکی، ارزان قیمت بودن و حمل بار زیاد است [۹]. در این راستا تعامل بین ربات و اپراتور انسانی که ربات، وظیفه تحمل وزن و اپراتور وظیفه جهت‌دهی ابزار را بر عهده دارد مطالعه می‌گردد. این ایده در فرآیندهای ساخت، بسیار کارا به نظر می‌رسد. علاوه بر آن در انتهای کار طراحی مناسب دستگاه هوشمند (ربات) برای فرآیند پولیشکاری صورت می‌گیرد که شامل شناخت و درک درست فرآیند پولیشکاری، طراحی مکانیکی دستگاه برای فرآیند پولیشکاری، تحلیل نیرویی بین اجزای اصلی ربات، اپراتور و محیط در یک فرآیند پولیشکاری مشخص می‌باشد.

## ۱-۷ نتیجه‌گیری

در یک جمع‌بندی، هدف پروژه، بررسی تأثیر کلیه متغیرهای در دسترس در ربات کابلی موازی هنگام عملکرد است و ارائه مدلی برای پیش‌بینی خروجی آن مبتنی بر متغیرهای مهم به صورت ریاضی یا روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی. بدیهی است کلیه صنایع که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم درگیر فرآیند ربات‌های موازی هستند می‌توانند از نتایج این تحقیق استفاده کنند. این پایان‌نامه در چهار فصل تهیه شده است. فصل اول شامل مقدمه و مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده پیشین بر روی فرآیند سنگ‌زنی رباتیکی و تشریح صورت مسئله بود که بیان شد. در فصل دوم پارامترهای سنگ‌زنی، فرآیندهای دینامیکی سنگ‌زنی و قیود ابزار ماشین محاسبه شده است و مدل‌های سنگ‌زنی دینامیکی طبق آزمایش‌های عملی تعریف شده است. در فصل سوم مدل مرکب فضایی مورد بررسی قرار گرفته شده است و نتایج و مقایسات آورده شده است. سرانجام در فصل پایانی به بیان نتیجه‌گیری‌ها و کارهای آینده پرداخته شده است.

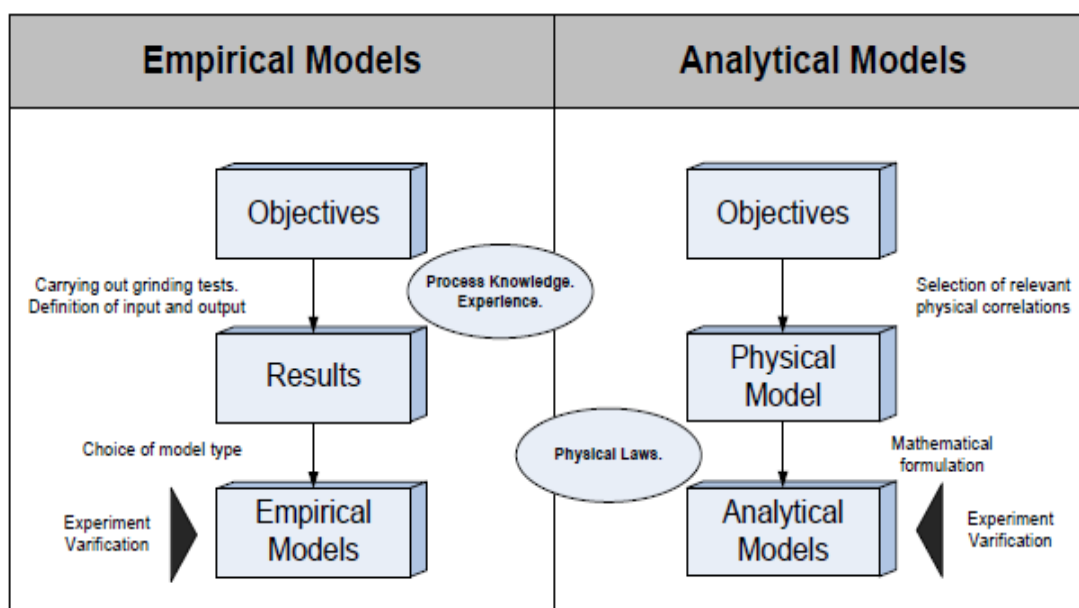
## فصل دوم

### مدل سازی تعامل اپراتور و ربات پولیشکاری

## ۱-۲ مقدمه

پولیشکاری، یک روش کاربردی برای تراشیدن قطعه کار جهت بهبود کیفیت بالای سطح و دقت بالای شکل و اندازه می‌باشد. نیرویی که حین فرآیند پولیشکاری وارد می‌شود فاکتور کلیدی است که روی کیفیت و دقت پولیشکاری اثر دارد و به نیروی پولیشکاری معروف است که به نیروهای استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شود. نیروی پولیشکاری استاتیکی تأثیر بسیاری در سطح چرخ، براده برداری مواد و رفتار شکل پذیری سطح دارد و بنابراین کیفیت پولیشکاری مانند زبری سطح، یکپارچگی لایه سطح، اندازه و دقت فرم را تعیین می‌کند در حالی که نیروی دینامیکی تأثیر اصلی آن بر روی کار دینامیکی نیروی پولیشکاری و لرزش آن‌هاست که دقت اندازه گیری، تراشیدن سطح، عمر ابزار و قابلیت اطمینان ماشین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین نیروی پولیشکاری، ابزار بسیار قدرتمندی برای انتخاب بهینه پارامترهای فرآیند و بهینه سازی ساختمان ابزار ماشین می‌باشد. اولین موضوع مورد بررسی در این پژوهش، مطالعه و تحلیل پارامترهایی که در نیروی دینامیکی مؤثرند و دومین موضوع مورد توجه، مدل سازی تغییرات عمق پولیشکاری روی چرخ و قطعه کار می‌باشد. در نهایت بر اساس تغییرات دینامیکی فرآیند، سینماتیک پولیشکاری و قیود مهندسی مدل نیروی دینامیکی تحلیل می‌شود.

این کار در واقع بسیار گسترده است با این حال می‌توان آن را به دو بخش تجربی و تحلیلی تقسیم کرد. شکل ۱-۲ تفاوت این دو روش را نشان می‌دهد. مدل تجربی، توسط مقادیر محاسبه شده از آزمایش سنگ‌زنی به دست می‌آید. در حالی که مدل تحلیلی بر اساس تحلیل فرآیند با استفاده از روابط ریاضی مدل کیفی به دست می‌آید.



شکل ۱-۲ مقایسه مدل‌سازی تجربی و مدل‌سازی تحلیلی [۲۶]

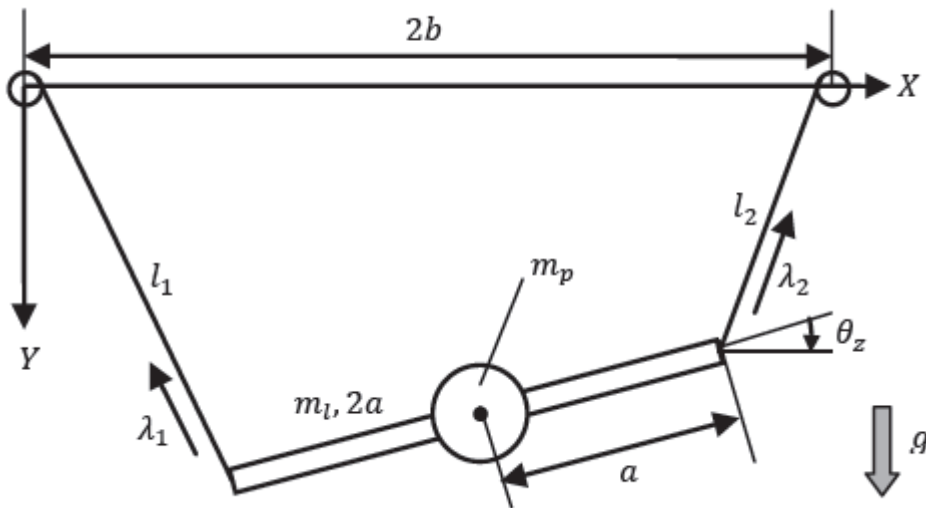
در ادامه، یک مدل تجربی که می‌تواند برای پیش‌بینی لرزش نیروی پولیشکاری دینامیکی طی فرآیند، ارائه شده است و همچنین مدل ربات موازی صفحه‌ای معرفی شده و روابط سینماتیک و دینامیک برای آن استخراج می‌گردد.

## ۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای

### ۱-۲-۲ شماتیک

شکل ۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای را نشان می‌دهد که فضای کاری این ربات در یک صفحه می‌باشد. در این ربات، قسمت انتهایی به صورت یک میله می‌باشد که به دو کابل متصل است و کابل‌ها به پولی متصل می‌باشند که پولی‌ها توسط موتور، کنترل می‌شوند و با تغییر طول کابل‌ها توسط موتورها، می‌توان موقعیت با متصل به قسمت انتهایی را کنترل کرد. در مدل طرح شده، دو دستگاه مختصات نسبی و مطلق وجود دارد. مرکز دستگاه مختصات مطلق XYZ بر روی محور پولی کشنده کابل اول قرار داشته و محور x آن از محور پولی‌های کشنده کابل‌ها عبور می‌کند و جهت

محور  $Y$  رو به پایین و در جهت بردار گرانش می‌باشد. مرکز دستگاہ مختصات نسبی  $XYZ$  بر روی محل اتصال بار قرار داشته و محور  $X$  به موازات میلهٔ انتهایی بوده و جهت محور  $Y$  رو به پایین می‌باشد.



شکل ۲-۲ ربات موازی کابلی صفحه‌ای [۲۷]

که پارامترهای قابل تعریف برای سیستم فوق به شرح زیر می‌باشد:

$m_1$  - جرم میله

$m_p$  - جرم بار انتهایی

$\bar{l}_i$  - بردار کابل  $i$ ام ( $i=1,2$ )

$\bar{\lambda}_i$  - بردار یکه کشش کابل  $i$ ام ( $i=1,2$ )

$a_i$  - بردار بین نقطهٔ اتصال بازو و کابل  $i$ ام در دستگاہ متصل به پایه ( $i=1,2$ )

$2a$  - طول میله

$2b$  - فاصلهٔ بین مرکز پولی‌ها

در این مدل، طول میله  $2a$  در نظر گرفته شده و بار به وسط میله (مرکز جرم میله نیز در وسط میله قرار دارد) اتصال دارد و از جرم کابل‌ها صرف نظر شده است.



## ۲-۲-۲ سینماتیک-استاتیک و ارون

در یک سیستم، چنانچه تعداد درجات آزادی بیشتر از تعداد قیود باشد به سیستم زیر مقید<sup>۲۹</sup> معروف است. از سیستم‌های زیر مقید در کاربردهایی که بخواهیم تنها تعدادی از درجات آزادی سیستم کنترل شود استفاده می‌گردد. ربات نشان داده شده در شکل ۲-۲ دارای سه درجه آزادی می‌باشد اما تنها دارای دو قید که کابل‌های کشنده است می‌باشد و در گروه سیستم‌های زیر مقید قرار می‌گیرد. از آنجایی که ربات کابلی صفحه‌ای نشان داده شده در شکل ۲-۲ یک ربات زیر مقید است، مسئله سینماتیک و استاتیک باید به طور همزمان حل گردد. در این قسمت، با مشخص بودن موقعیت بار انتهایی باید طول کابل‌ها را به دست آورد. همچنین فرض می‌شود که اندازه بردار  $B_1 B_2$  بزرگ‌تر از طول میله انتهایی می‌باشد ( $b > a$ ). برای این ربات بردار کابل‌ها طبق مرجع [۲۸] از رابطه ۲-۱ تعیین می‌گردد.

$$\begin{aligned} \bar{l}_1 = A_1 - B_1 &= \begin{bmatrix} x - a \cos \theta \\ y - a \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \\ \bar{l}_2 = A_2 - B_2 &= \begin{bmatrix} 2b - (x + a \cos \theta) \\ y + a \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-2)$$

که در آن  $x$  و  $y$  موقعیت محل اتصال بار بوده و  $\theta$  زاویه قسمت انتهایی می‌باشد. برای این مدل، بردار یکه کشش کابل‌ها از رابطه ۲-۲ تعیین می‌گردد

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_1 &= -\frac{\bar{l}_1}{\|\bar{l}_1\|} \\ \bar{\lambda}_2 &= -\frac{\bar{l}_2}{\|\bar{l}_2\|} \end{aligned} \quad (2-2)$$

<sup>29</sup> Underactuated system

ماتریس دوران دستگاه مختصات نسبی نسبت به دستگاه مرجع، دارای فرم ۳-۲ است.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

همچنین بردارهای  $\bar{a}_1$  و  $\bar{a}_2$  در دستگاه نسبی متصل به میله به صورت ماتریس های ۴-۲ تعریف می شوند.

$$\bar{a}_1 = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{a}_2 = \begin{bmatrix} -a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

با نوشتن معادلات تعادل در راستای x و y مقدار کشش کابلها حاصل می شود [۲۹].

$$T_1 = \frac{mg \left\| \bar{l}_1 \right\| (x + a \cos \theta_z - 2b)}{2ay \cos \theta_z - 2ax \sin \theta_z - 2by + 2ab \sin \theta_z} \quad (5-2)$$

$$T_2 = \frac{mg \left\| \bar{l}_2 \right\| (x - a \cos \theta_z)}{2ay \cos \theta_z - 2ax \sin \theta_z - 2by + 2ab \sin \theta_z} \quad (6-2)$$

معادله تعادل گشتاور حول محل اتصال بار، دارای فرم ۷-۲ است.

$$\sum M = \left\| R \bar{a}_1 \times \lambda_1 \right\| T_1 + \left\| R \bar{a}_2 \times \lambda_2 \right\| T_2 = 0 \quad (7-2)$$

با جایگذاری پارامترها در رابطه ۷-۲ معادله ۸-۲ حاصل می شود.

$$\cos \theta_z (2xy - 2by) + \sin \theta_z (4bx - 2x^2) - 2ab \sin \theta_z \cos \theta_z = 0 \quad (8-2)$$

با معلوم بودن مقادیر x, y، با حل عددی رابطه ۸-۲، مقدار زاویه  $\theta_z$  حاصل می شود که در به دست آوردن جواب، تنها بازه بین  $-90^\circ$  و  $90^\circ$  در نظر گرفته می شود. با معلوم بودن موقعیت مرکز قسمت انتهایی و با به دست آمدن مقدار  $\theta_z$ ، با جایگذاری مقادیر در رابطه ۱-۲ می توان طول کابلها

را به دست آورد. همان طور که در رابطه ۲-۸ مشاهده می‌شود، مقدار زاویهٔ میلۀ انتهایی تنها به فیزیک سیستم و موقعیت بار بستگی دارد و جرم بار متصل به آن تأثیری در زاویهٔ آن ندارد. چنانچه بخواهیم جسم انتهایی فقط زاویهٔ خاصی داشته باشد، باید فضای کاری که ربات می‌تواند زاویهٔ مورد نظر را دارا باشد تعیین کنیم. تعیین فضای کاری زمانی که زاویهٔ جسم انتهایی مشخص است با توجه به نامساوی های  $T_1 \geq 0$  و  $T_2 \geq 0$  صورت می‌گیرد. چنانچه زاویهٔ انتهایی مشخص باشد، با جایگذاری مقدار  $\theta_z$  در رابطه ۲-۸ یک منحنی هذلولی حاصل می‌شود. حال باید تعیین کنیم که چه ناحیه ای از منحنی هذلولی به دست آمده جزء فضای کاری ربات می‌باشد. برای این منظور باید شرط مثبت بودن کشش کابل‌ها در نظر گرفته شود. کشش کابل‌ها زمانی مثبت است که صورت و مخرج در روابط ۲-۵ و ۲-۶ هم علامت باشند، بدین ترتیب شرایطی که کشش مثبت کابل‌ها را حاصل می‌کند به صورت معادلهٔ ۲-۹ به دست خواهد آمد [۲۹].

$$a \cos \theta_z < x < 2b - a \cos \theta_z \quad (۹-۲)$$

$$2ay \cos \theta_z - 2ax \sin \theta_z - 2by + 2ab \sin \theta_z < 0 \quad (۱۰-۲)$$

### ۳-۲-۲ سینماتیک-استاتیک مستقیم

در این قسمت، با مشخص بودن طول کابل‌ها و استاتیک سیستم، موقعیت بار انتهایی زمانی که سیستم در حالت تعادل استاتیکی می‌باشد محاسبه می‌گردد. برای این سیستم با توجه به رابطهٔ ۲-۱۰، رابطهٔ بین طول کابل‌ها و موقعیت بار برقرار است

$$x^2 + y^2 + a^2 - 2ax \cos \theta_z - 2ay \sin \theta_z - \|l_1\|^2 = 0$$

$$[2b - (x + a \cos \theta_z)]^2 + (y + a \sin \theta_z)^2 - \|l_2\|^2 = 0 \quad (۱۱-۲)$$

با مشخص بودن طول کابل‌ها، با حل عددی همزمان روابط معادله ۲-۸ و ۲-۱۱ مقادیر  $x$  و  $y$  و  $\theta_z$  حاصل می‌شود.

## ۲-۲-۴ دینامیک

برای به دست آوردن معادلات دینامیک در این مدل از روش نیوتن-اویلر استفاده می‌گردد. فرم کلی معادلات دینامیک برای ربات‌های موازی کابلی به صورت رابطه ۲-۱۲ است.

$$D(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x}) + G(x) = J^T T \quad (12-2)$$

که  $D(x)$  ماتریس اینرسی،  $C(x, \dot{x})$  بردار ترم‌های سرعت،  $G(x)$  بردار گرانش و  $J^T$  ماتریس ژاکوبین نیرو می‌باشد. بردار  $T = [T_1 \quad T_2]^T$  بردار کشش کابل‌ها بوده و موقعیت زاویه قسمت انتهایی در دستگاه مرجع به صورت  $x = [x \quad y \quad \theta_z]^T$  تعریف می‌شود. برای سیستم مورد نظر از رابطه ۲-۱۳ تعیین می‌شود [۳۰].

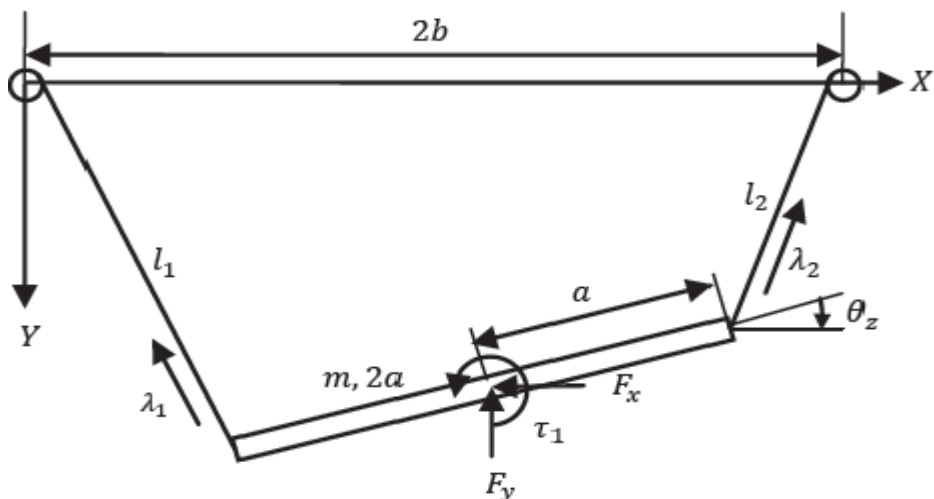
$$J^T = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 & \bar{\lambda}_2 \\ \left\| Ra_1 \times \bar{\lambda}_1 \right\| & \left\| Ra_2 \times \bar{\lambda}_2 \right\| \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

که ماتریس  $D(x)$  و بردارهای  $C(x, \dot{x})$  و  $G(x)$  به صورت زیر می‌باشند [۳۱].

$$D(x) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad G(x) = [0 \quad -mg \quad 0] \quad \text{و} \quad C(x, \dot{x}) = 0 \quad (14-2)$$

که  $m$  مجموع جرم میله و بار بوده و  $I_{zz}$  نیز ممان اینرسی بار و میله حول محور  $z$  می‌باشد.

مدل ربات نشان داده شده در شکل ۲-۲ که به صفحه متحرک آن نیرو و گشتاور اعمال شده است را می‌توان در شکل ۲-۳ مشاهده کرد.



شکل ۲-۳ ربات کابلی صفحه ای تحت بارگذاری و گشتاور خارجی [۲۷]

با استفاده از معادلات دینامیک به دست آمده از روش لاگرانژ، فرم ماتریسی معادلات دینامیکی به صورت زیر حاصل می شود

$$M \ddot{q} + C + G = U \quad (۱۵-۲)$$

که از معادلات به دست آمده ماتریس های  $M$ ,  $G$ ,  $C$ ,  $U$  به صورت ۱۶-۲ حاصل می شود

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad U = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \\ \tau \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (۱۶-۲)$$

که عناصر ماتریس های رابطه ۱۶-۲ در پیوست ۱ آورده شده است.

## ۲-۳ پارامترهای مؤثر در نیروی دینامیکی

طبق مدل نیروی سنگ‌زنی دینامیکی، ابتدا باید مدل نیروی استاتیکی نرمال بر پایه مدل‌های قبلی تحلیل شود. اغلب مدل‌های نیرو با هدف توصیف اصل فرآیند سنگ‌زنی، طراحی شده‌اند. نیروی سنگ‌زنی در اصل، با پارامترهای فناوری سنگ‌زنی و خواص ماده در ارتباط است که می‌تواند توسط پارامترهای سرعت چرخ، سرعت قطعه کار، عمق برش، قطر و غیره توضیح داده شود. به هر حال یک مدل نیروی دینامیکی تئوری، بسیار پیچیده است زیرا برخی پارامترها در مدل‌های ریاضی و فیزیکی، تنها می‌توانند در تحلیل‌های استاتیکی به دست آیند (به عنوان مثال، سختی برینل مواد دینامیکی). بنابراین در اصل سنگ‌زنی ایده آل، شکل گوشه‌های برش نمی‌تواند در مدل‌سازی نیروی دینامیکی مطرح شوند [۳۲]. بر همین اساس تحلیل و مدل تجربی، یک راه مؤثر برای نیروی دینامیکی نشان داده شده توسط برخی قیود مهندسی (ساختار چرخ و جنس قطعه کار) مانند ضرایب تجربی می‌باشد. یک مدل نیروی سنگ‌زنی استاتیکی تجربی مبتنی بر پارامترهای آزمایش شده مانند  $a_p$ ،  $V_w$ ،  $V_s$  و  $D$  می‌باشد که در عمل به صورت مستقل از هم قابل تغییرند. در یک فرآیند دینامیکی، عمق برش  $a_p$  تابع تغییراتی که توسط جابجایی چرخ سنگ‌زنی و اجزاء به وجود می‌آید می‌باشد. بنابراین تغییرات دینامیکی عمق برش برای محاسبه نیروی دینامیکی از نقطه نظر سینماتیک به دست می‌آید. در این تحقیق، مدل نیروی دینامیکی توسط سرعت قطعه کار  $V_w$ ، سرعت سنگ‌زنی  $V_s$ ، عمق برش  $a_p$ ، قطر چرخ سنگ‌زنی  $D$  و تغییرات دینامیکی عمق برش  $\Delta a_p$  به عنوان مقادیر ورودی محاسبه می‌شوند.

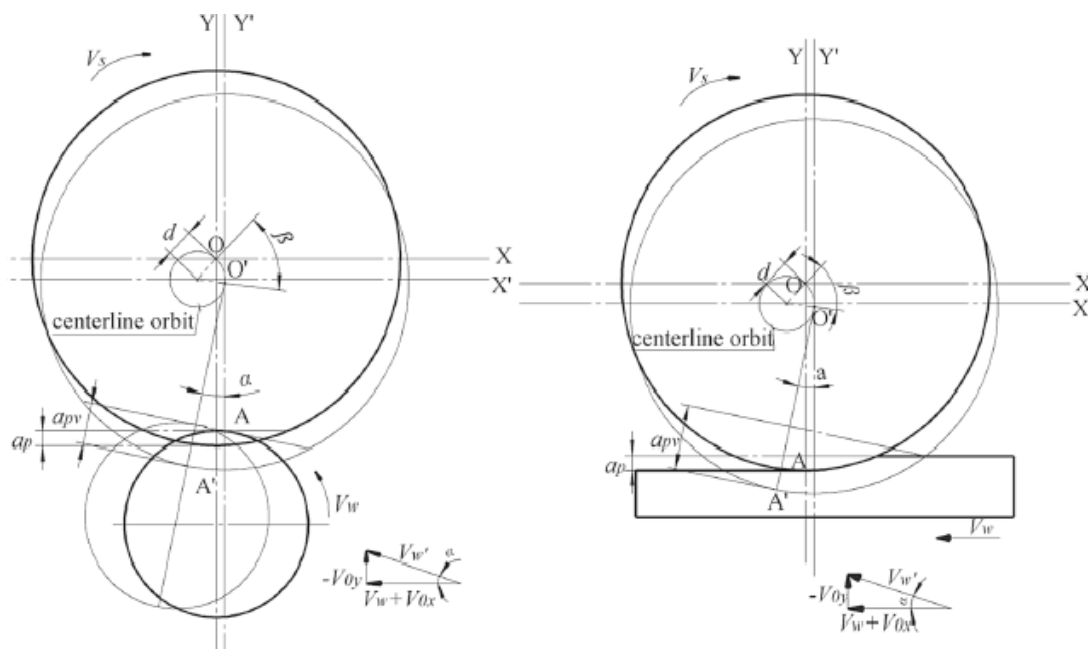
## ۲-۴ مدل‌سازی تغییرات دینامیکی عمق برش

برای به دست آوردن عمق برش  $a_p$  در روابط تغییرات آن ( $\Delta a_p$ ) لازم است فرآیند دینامیکی مرتبط با ارتعاش را مدل کرد. در اصل، فاکتور اصلی که سبب رابطه جابجایی بین چرخ سنگ‌زنی و قطعه کار

می‌شود، عدم تعادل چرخ و میله است که به دلیل حرکت بین چرخ سنگ‌زنی و قطعه کار به وجود می‌آید. تحلیل فرآیند سنگ‌زنی، فرضیات زیر را باید داشته باشد:

- چرخ سنگ‌زنی و قطعه کار، هندسه ایده آل قبل از سنگ‌زنی دارند.
- حرکت تغذیه کردن، ایده آل است.
- عدم تعادل محور چرخ سنگ‌زنی دایره ای و قطعه کار، بسیار کمتر از محور چرخ سنگ‌زنی است.

طبق شکل ۲-۴،  $O$  مرکز ایده آل و  $O'$  مرکز موقت و  $d$  خروج از مرکز است.



(الف). سنگ‌زنی دایروی

(ب). سنگ‌زنی مسطح

شکل ۲-۴ مدل سنگ‌زنی دینامیکی بر پایه عدم تعادل شفت. دایره صلب پر رنگ، شماتیک سنگ‌زن ایده آل و دایره

صلب کم رنگ، شماتیک سنگ‌زن تحت لرزش است [۳۲]

نقطه "O" را در موقعیت اولیه، زمانی که شفت با زاویه  $\theta$  می‌چرخد قرار می‌دهیم و مرکز چرخ سنگ‌زنی و قطعه کار با سرعت  $V_0$  حرکت می‌کند.  $V_{0x}$  و  $V_{0y}$  سرعت در دو راستا در سیستم‌های مختصات کارتزین بردار  $V_0$  می‌باشند. در این مدل، مختصات مرکز شفت،  $(x_0, y_0)$  مرتبط با مختصات

”O“، با خروج از مرکز  $d = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$  سپس موقعیت ”O“،  $(x_1, y_1)$  می باشد که توسط روابط ۱۷-۲ تا ۱۹-۲ به دست می آید.

$$X_1 = -d \cos(\theta + \theta_0) + X_0$$

$$X_0 = a \cos(\theta_0) \quad (17-2)$$

$$Y_0 = b \sin(\theta_0)$$

$$Y_1 = -d \sin(\theta + \theta_0) + Y_0 \quad (18-2)$$

$$\Theta = \omega t \quad (19-2)$$

## ۵-۲ مدل سازی نیروی سنگ زنی

مدل تجربی ارائه شده در تحقیق [۳۲]، از آزمایش نیروی دینامیکی حول پارامترهای  $V_w, V_s$  و  $\Delta a_p$  (محاسبه شده از روابط پیوست ۲ بر اساس پارامترهای  $V_w, \omega, D, d$  و  $a_p$ )، پارامترهای مدل و قیود مهندسی به دست آورده شده است. نیرو می تواند توسط نیروی استاتیک و نیروی دینامیک، مدل شود.

$$f_n(t) = F_{n0} + (F_{n1} \sin(\omega t + \phi_1) + F_{n2} \sin(2\omega t + \phi_2) + F_{n3} \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots) \quad (20-2)$$

$$f_t(t) = F_{t0} + (F_{t1} \sin(\omega t + \phi_1) + F_{t2} \sin(2\omega t + \phi_2) + F_{t3} \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots) \quad (21-2)$$

دامنه نیروی دینامیکی در  $M$  فرکانس چرخش می تواند از طریق زیر به دست آید

$$F_{nMN} = C_{nMN} (V_s)^\alpha (V_w)^\beta (\Delta a_{pvMN})^\gamma \quad (22-2)$$

$$F_{tMN} = C_{tMN} (V_s)^\alpha (V_w)^\beta (\Delta a_{pvMN})^\gamma \quad (23-2)$$

که در آن  $\Delta a_{pvMN}$  برای  $N$  امین دامنه فوریه  $\Delta a_{pv}$ ،  $C_N$  نامیده و  $\omega = 2\pi * M$  در نظر گرفته می شود.

در جدول ۱-۲ مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است



جدول ۱-۲ پارامترهای آزمایشگاهی [۳۲]

	Grinding wheel	Workpiece
Material specification	Cubic boron nitride	18Ni(250) maraging steel
Dimension	Φ 152.4 mm * 12.7 mm	10 mm * 10 mm * 76.2 mm

## ۶-۲ اندازه گیری مقادیر آزمایشگاهی

سه نمونه از مقادیر نیرو در شکل ۲-۲، شامل مقادیر نیروی اصلی، نیروی استاتیکی و نیروی دینامیکی نشان داده شده است که  $F_{N1}$ ،  $F_{N2}$  و  $F_{N3}$  بیانگر اولین، دومین و سومین مقادیر هارمونیک نیروی نرمال دینامیکی و  $F_{T1}$ ،  $F_{T2}$  و  $F_{T3}$  به طور مشابه، به معنی نیروی مماسی دینامیکی است. در اصل، نیروی استاتیک اگر طی فرآیند، ثابت باشد می تواند به شناسایی کمک کند.

## ۷-۲ نتایج

در جدول ۲-۲ مقادیر تغییرات عمق برش و نیروی نرمال و مماسی، با سه مقدار از سرعت چرخ ۱۵، ۲۰ و ۳۰ m/s، سه مقدار از نرخ تغذیه ۰،۰۰۵، ۰،۰۲۵ و ۰،۰۱۲۵ m/s و سه مقدار از عمق برش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ mm به دست آمده است. تغییرات عمق برش بر اساس مقدار جابجایی از مرکز ( $d=0.038$  mm) و پارامترهای سنگ زنی با استفاده از روابط پیوست ۲ محاسبه می شود.

جدول ۲-۲ مقادیر نیروی آزمایشگاهی سنگ زنی [۳۲]

NO.	Vs (m/s)	M (HZ)	V <sub>w</sub> (m/s)	a <sub>p</sub> (μm)	[Δa <sub>p0MN</sub> ] (N=1,2,3)	[F <sub>nMN</sub> ] (N=1,2,3) (N)	[F <sub>tMN</sub> ] (N=1,2,3) (N)
1	15	31	0.05	10	[0.189 4.61E-4 3.33E-7]	[12.3 7.2 2.6]	[10.5 4.4 2.0]
2	15	31	0.025	30	[0.641 1.72E-3 1.28E-7]	[20.8 8.5 3.1]	[16.0 3.2 1.6]
3	15	31	0.0125	20	[1.05 6.84E-3 4.71E-7]	[14.1 4.5 2.4]	[9.8 3.3 1.9]
4	20	41	0.05	20	[0.350 7.76E-4 1.57E-7]	[20.4 5.7 2.4]	[11.8 3.4 1.4]
5	20	41	0.025	10	[0.494 3.07E-3 8.89E-7]	[10.6 3.2 1.6]	[2.4 3.1 1.7]
6	20	41	0.0125	30	[1.71 1.21E-2 3.42E-7]	[17.5 4.8 2.0]	[9.1 2.9 1.1]
7	30	62	0.05	30	[0.641 1.72E-3 1.28E-7]	[24.5 7.3 3.2]	[12.1 5.3 1.5]
8	30	62	0.025	20	[1.05 6.84E-3 4.71E-7]	[14.7 5.1 1.9]	[8.6 3.3 0.9]
9	30	62	0.0125	10	[1.48 2.73E-2 2.67E-06]	[8.0 4.1 1.0]	[4.3 2.1 0.5]

برای به دست آوردن مدل تجربی، معادلات ۲-۲۲ و ۲-۲۳ می‌توانند خطی شوند. مقایسه بین نتایج مدل و مقادیر آزمایشگاهی بیانگر این است که انحراف بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر محاسبه شده از مدل تجربی در یک محدوده قابل قبولی قرار دارد. به بیان دیگر، نتایج، بیان می‌کند که فاکتور اصلی نیروی دینامیکی در فرآیند سنگ‌زنی، عدم تعادل سیستم شفت است.

## ۸-۲ نتیجه گیری و خاتمه

به عنوان یک جمع بندی، مدل ارائه شده در این فصل شامل مراحل زیر بود:

- بر اساس مدل‌های نیروی استاتیکی موجود و تحلیل فرآیند سنگ‌زنی دینامیکی، پارامترهای مؤثر در نیروی دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت.
- فرآیند دینامیکی مرتبط با لرزش جهت بیان عمق برش ( $a_p$ ) در معادلات تغییرات آن ( $\Delta a_p$ ) مدل شد.
- بر اساس مدل تغییرات دینامیکی عمق برش، فاکتور اصلی مؤثر در نیروی دینامیکی از بعد سینماتیکی محاسبه شد.
- یک مدل تجربی مرتبط با پارامترهای  $V_w, V_s$  و  $\Delta a_p$  و دامنه محاسبه شده بر اساس پارامترهای  $V_w, D, V_s$  و  $\Delta a_{p0}$  ارائه شد.
- مقادیر نیرو و ضرایب تجربی محاسبه شد.
- مدل نیروی دینامیکی توسط کاربرد دامنه و مقایسه محدوده به دست آورده شد.

## فصل سوم

# مدل فضایی و تعامل با اپراتور در یک فرآیند پولیشکاری

### ۱-۳ مقدمه

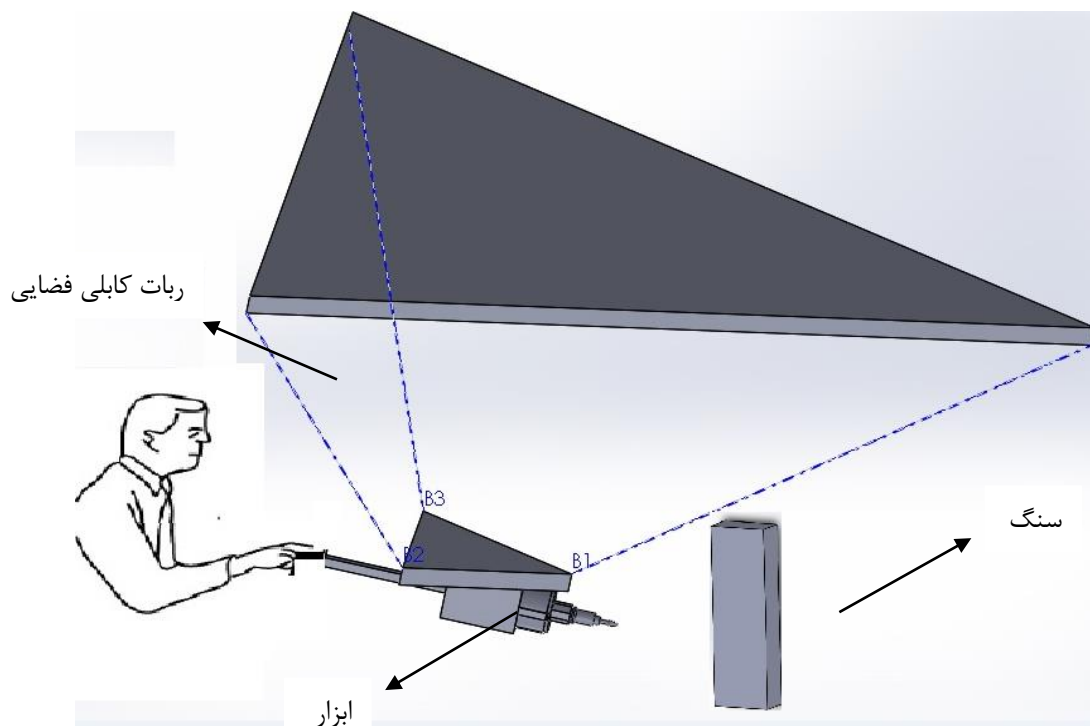
در این فصل برای مشخص شدن فرم شبیه سازی در ادامه پایان نامه، باید ابتدا هدف کار و طرح مناسب آن با تمام جزئیات، تشریح شده و سپس روابط و فرمول های مربوط به ربات و نحوه تعامل آن با انسان بیان گردد. این کار مستلزم تلفیق فرم در نظر گرفته شده، هندسه موضوع، حل مسئله سینماتیک-استاتیک و ارون مربوط به مدل و در نهایت، تشریح کامل حل مسئله و ارون می باشد. علاوه بر آن باید جزئیات مربوط به دینامیک مدل، عملیات پولیشکاری و فرضیات استفاده شده در عملیات پولیشکاری و تعامل انسان و ربات بیان گردد تا جزئیات کامل، هنگام شبیه سازی در دسترس بوده و هیچ ابهامی در بیان روابط وجود نداشته باشد. با این پیش زمینه، در ابتدا به طراحی پایه ربات کابلی فضایی در عملیات پولیشکاری خواهیم پرداخت و سپس قسمت های مختلف آن با جزئیات و روابط، بیان خواهد گردید.

### ۲-۳ طراحی ربات کابلی فضایی در یک عملیات پولیشکاری

در این قسمت، طرح مناسب برای برآورده کردن هدف مورد نظر انتخاب می گردد. هدف این است که با استفاده از یک ربات کابلی، ابزاری جهت عملیات پولیشکاری را از نقطه ای به نقطه دیگر حمل کرده سپس توسط اپراتور انسانی، جهت دهی مورد نظر صورت پذیرد. به منظور طراحی ربات کابلی فضایی جهت انجام عملیات پولیشکاری از یک ربات موازی کابلی استفاده شده که ابزار روی عملگر نهایی<sup>۳۰</sup> آن قرار گرفته و از طرفی اپراتور انسانی که وظیفه جهت دهی را به عهده دارد به ابزار، نیرو وارد می کند. برای کاهش امکان تداخل کابل ها از ربات موازی کابلی با سه کابل استفاده شده است. در این مدل، ابتدا قسمت موازی که ابزار را حمل می کند توسط اپراتور موقعیت دهی می شود، سپس ابزار، مسیر مورد نظر را بر روی سنگ، برش می دهد. مدل طرح شده در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

---

<sup>30</sup> End-effector



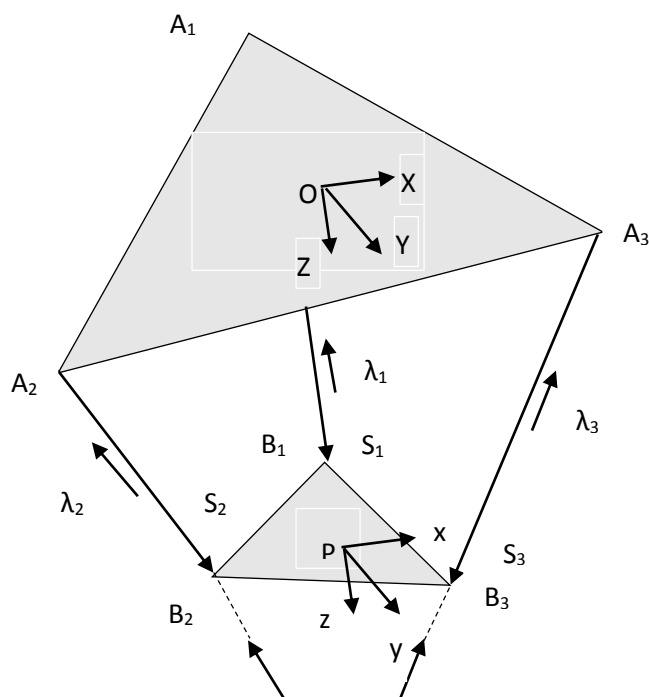
شکل ۳-۱ ربات کابلی فضایی در تعامل با انسان در عملیات پولیشکاری

### ۳-۳ ربات کابلی فضایی

#### ۱-۳-۳ شماتیک

این ربات شامل یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک که به شکل متساوی الاضلاع تشکیل شده است می‌باشد و به وسیله سه کابل به یکدیگر متصل شده‌اند. دستگاه مختصات مطلق XYZ بر روی صفحه ثابت و دستگاه نسبی XYZ بر روی صفحه متحرک قرار گرفته است. کابل‌ها به پولی متصل بوده و پولی‌ها نیز به موتور متصل می‌باشد که با کنترل طول کابل‌ها به وسیله موتور می‌توان موقعیت صفحه متحرک را کنترل کرد. شماتیک مدل مطرح شده در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. از آنجا که در این مدل، تنها سه قید وجود دارد و درجات آزادی (شش عدد) بیشتر از تعداد قیود می‌باشد سیستم زیر مقید است. بدین دلیل در این ربات طی حرکت قسمت انتهایی در مسیر مشخص، امکان

کنترل زاویه قسمت انتهایی وجود ندارد و این زوایا به مشخصات سیستم، موقعیت و شتاب‌های خطی آن بستگی دارد.



شکل ۲-۳ ربات کابلی فضایی

در شکل نشان داده شده  $A_1$  و  $A_2$  و  $A_3$  رئوس صفحه ثابت و  $B_1$  و  $B_2$  و  $B_3$  رئوس صفحه متحرک می‌باشد و دستگاه‌های مختصات بر روی مراکز جرم قرار دارند. در دستگاه مختصات مطلق و نسبی، به ترتیب جهت محور  $y$  ها به سمت  $A_1$  و  $B_1$  بوده و جهت محور  $z$  ها به سمت پایین و عمود بر صفحه ثابت و صفحه متحرک است.

### ۲-۳-۳ هندسه

در شکل ۲-۳،  $s_i$  نشان دهنده بردار کابل،  $F_i$  نشان دهنده بردار نیروی کابل و  $u_i$  بردار یکه بردار نیروی کابل  $i$  ام می‌باشد. در شکل ۲-۳ مرکز جرم و مرکز دستگاه نسبی در نقطه  $p$  قرار دارد که مختصات آن نسبت به نقطه  $O$  به صورت زیر است

$$\vec{p} = [x \quad y \quad z]^T \quad (1-3)$$

با در نظر گرفتن زوایای  $\psi$  و  $\theta$  و  $\varphi$  به عنوان زوایای یاب و پیچ و رول، ماتریس دوران دستگاه نسبی نسبت به دستگاه مطلق به صورت رابطه ۲-۳ حاصل می‌شود.

$$R = R_{z,\varphi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\psi} \quad (2-3)$$

که

$$R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix}, \quad R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix}, \quad R_{z,\varphi} = \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 \\ -s_\varphi & c_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

با جایگذاری رابطه ۳-۳ در ۲-۳ ماتریس دوران به صورت معادله ۴-۳ حاصل می‌شود [۳۳].

$$R = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta & s_\varphi c_\psi + c_\varphi s_\theta s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi s_\theta c_\psi \\ s_\varphi c_\theta & c_\varphi c_\psi + s_\varphi s_\theta s_\psi & -c_\varphi s_\psi + s_\varphi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

مختصات رئوس صفحه ثابت در دستگاه مطلق به صورت روابط ۵-۳ می‌باشد.

$$A_1 = [0 \quad -L \quad 0]^T$$

$$A_2 = [-L \cos 30 \quad L \sin 30 \quad 0]^T$$

$$A_3 = [L \cos 30 \quad L \sin 30 \quad 0]^T$$

$$L = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot D \quad (5-3)$$

که در آن  $D$  طول اضلاع صفحه ثابت است. همچنین مختصات رئوس صفحه متحرک در دستگاه نسبی به صورت روابط ۶-۳ می‌باشد.

$$B_1 = [0 \quad -l \quad 0]^T$$

$$B_2 = [-l \cos 30 \quad l \sin 30 \quad 0]^T$$

$$B_3 = [l \cos 30 \quad l \sin 30 \quad 0]^T$$

$$l = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot d \quad (6-3)$$

که در آن  $d$  طول اضلاع صفحه متحرک است. بردار موقعیت نقاط رأس صفحه نسبت به نقطه  $p$  در دستگاه مطلق به صورت زیر حاصل می‌شود

$$\vec{r}_i \cdot \vec{b} = R \cdot B_i, \quad i=1,2,3 \quad (7-3)$$

بردار کابل  $i$  ام در دستگاه مطلق با استفاده از رابطه ۳-۸ محاسبه می‌گردد.

$$\vec{s}_i = \vec{p} + \vec{r}_i \cdot \vec{b}_i - A_i, \quad i=1,2,3 \quad (8-3)$$

بردار یکه نیروی کابل  $i$  ام دستگاه مطلق به صورت رابطه ۳-۹ محاسبه می‌گردد

$$\lambda_i = -\frac{\vec{s}_i}{\|\vec{s}_i\|}, \quad i=1,2,3 \quad (9-3)$$

### ۳-۳-۳ حل مسئله سینماتیک - استاتیک وارون

در این سیستم، از آنجایی که در ربات کابلی فضایی شش درجه آزادی وجود دارد و ربات تنها سه قید دارد، سیستم زیرمقید است. در سیستم‌های زیرمقید باید حل مسئله سینماتیک و استاتیک به طور همزمان انجام شود. برای ربات موازی کابلی فضایی با سه کابل، چنانچه سیستم در تعادل بوده و مختصات مرکز صفحه متحرک مشخص باشد می‌توان پیکربندی ربات را به دست آورد، برای این منظور باید زوایای یاو و پیچ و رول به دست آورده شود. بردار نیروی کابل  $i$  ام در دستگاه مطلق دارای رابطه ۳-۱۰ است.

$$\vec{F}_i = T_i \cdot \vec{\lambda}_i, \quad i=1,2,3 \quad (10-3)$$

که در آن  $T_i$  مقدار کشش کابل  $i$  ام می‌باشد. با مشخص بودن موقعیت صفحه متحرک با استفاده از معادلات تعادل نیرو مقدار کشش کابل‌ها از رابطه ۳-۱۱ محاسبه می‌گردد.

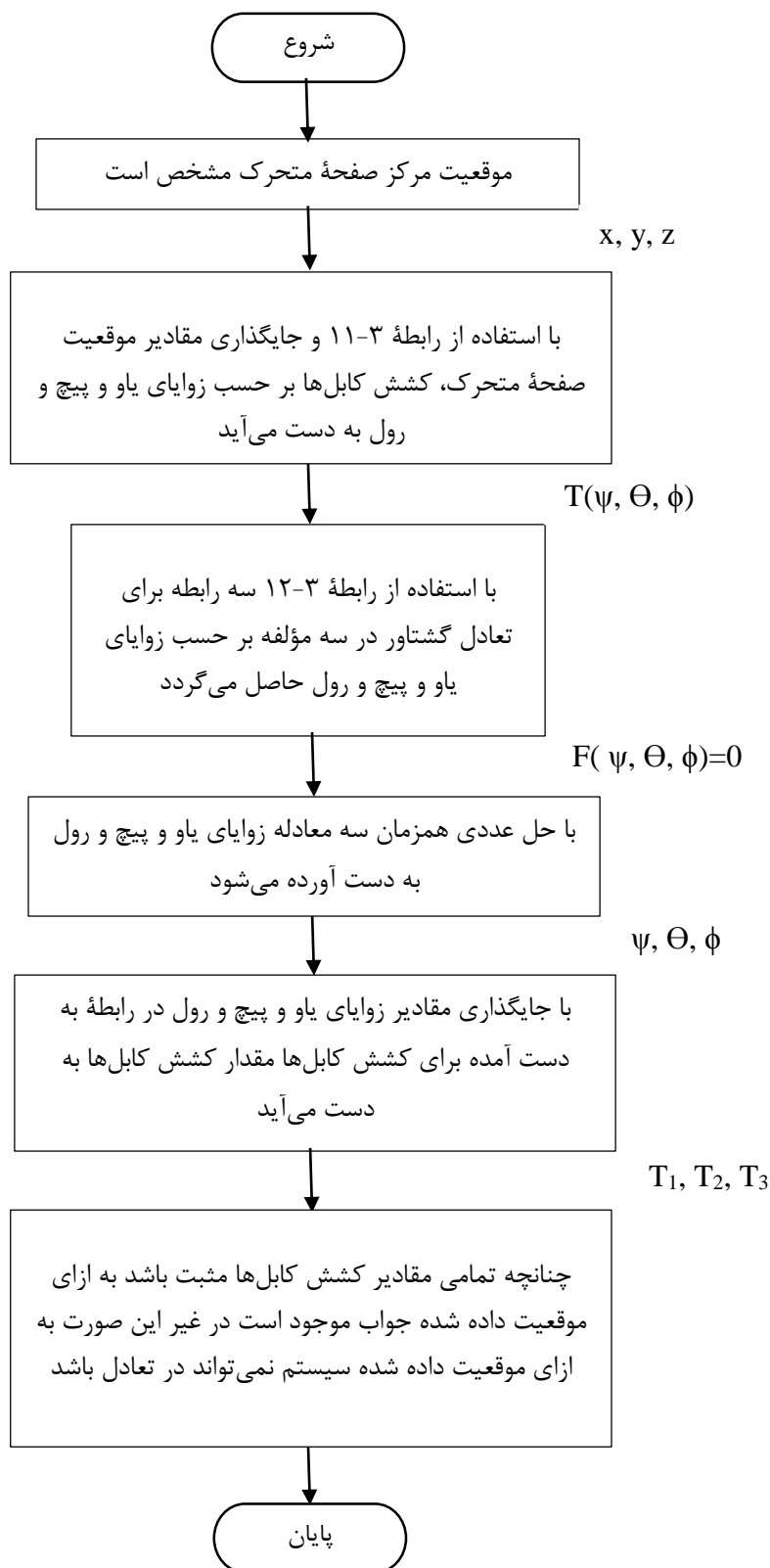


$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m.g \end{bmatrix}, \quad i=1,2,3 \quad (11-3)$$

که T بردار کشش کابل‌ها می‌باشد. با مشخص بودن موقعیت مرکز صفحه متحرک، کشش کابل‌ها از رابطه ۱۱-۳ بر حسب متغیرهای زوایای یاو و پیچ و رول به دست می‌آید. با نوشتن معادله تعادل گشتاور حول مرکز صفحه متحرک و جایگذاری روابط به دست آمده برای کشش کابل‌ها در معادلات تعادل گشتاور، سه معادله بر حسب زوایای صفحه متحرک حاصل می‌گردد. معادله تعادل گشتاور حول مرکز صفحه متحرک دارای رابطه به فرم ۱۲-۳ است.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{rb}_1 \times \lambda_1 & \vec{rb}_2 \times \lambda_2 & \vec{rb}_3 \times \lambda_3 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12-3)$$

با حل عددی سه معادله به دست آمده از رابطه ۱۲-۳ می‌توان زوایای یاو و پیچ و رول را محاسبه نمود. شکل ۳-۳ الگوریتم حل سینماتیک - استاتیک وارون برای ربات کابلی فضایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ الگوریتم حل مسئله سینماتیک=استاتیک وارون برای ربات کابلی فضایی

با به دست آمدن زوایای صفحه متحرک از روی مختصات و استاتیک مسئله، با استفاده از رابطه ۳-۸ می‌توان طول کابل‌ها را تعیین کرد. در [۳۳] برای محاسبه سینماتیک - استاتیک وارون از ماتریس

$M(O)$  شامل بردارهای نرمالیزه شده پلاکر با در نظر گرفتن قطب گشتاور بر روی محل اتصال کابل و پولی استفاده شده است. در نهایت با در نظر گرفتن اینکه مرتبه ماتریس باید کوچک تر و مساوی سه باشد، با مساوی صفر قرار دادن دترمینان کهدادهای ماتریس  $M(O)$  سه رابطه بر حسب زوایای یاو و رول و پیچ به دست می آید. با حل این سه معادله، ۲۴ دسته جواب به دست آورده شده که محاسبه کشش کابلها به ازای جوابهای مختلف، جوابهای قابل قبول استخراج می گردند (آن دسته از جواب که کشش مثبت کابلها را حاصل کند).

### ۴-۳-۳ دینامیک

معادلات دیفرانسیل غیرخطی حرکت در صفحه با استفاده از معادلات نیوتون-اویلر محاسبه می گردد. معادلات نیرو به صورت رابطه ۱۳-۳ حاصل می شود

$$\sum_{i=1}^3 \vec{F}_i - mg \vec{K} = m \ddot{\vec{p}} \quad , \quad i=1,2,3 \quad (13-3)$$

با استفاده از رابطه ۱۴-۳ می توان گشتاور وارده از طرف کابلها بر صفحه متحرک حول نقطه P را در دستگاه مطلق به دست آورد.

$$\vec{M}_i = \vec{r} \cdot \vec{b}_i \times \vec{F}_i \quad (14-3)$$

بردار سرعت زاویه ای صفحه متحرک نسبت به صفحه ثابت به صورت ماتریس ۱۵-۳ تعریف می گردد.

$$\vec{\omega} = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T = [\psi \quad \theta \quad \phi]^T \quad (15-3)$$

ماتریس اینرسی صفحه متحرک نسبت به نقطه P در دستگاه مختصات نسبی به صورت زیر تعریف می گردد.

$$I_{xyz} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

مومنوم زاویه‌ای نسبت به نقطه P در دستگاه نسبی دارای رابطه ۱۷-۳ است.

$$\Sigma M = \left( \frac{d\bar{H}_{xyz}}{dt} \right) + \bar{\omega} \times \bar{H}_{xyz} \quad (۱۷-۳)$$

با استفاده از رابطه ۱۷-۳ مؤلفه‌های گشتاور به صورت روابط ۱۸-۳ حاصل می‌شود [۳۴].

$$\Sigma M_x = \dot{H}_x - H_y \omega_z + H_z \omega_y$$

$$\Sigma M_y = \dot{H}_y - H_z \omega_x + H_x \omega_z \quad (۱۸-۳)$$

$$\Sigma M_z = \dot{H}_z - H_x \omega_y + H_y \omega_x$$

با به دست آوردن معادلات دینامیک از روش نیوتون-اویلر، دینامیک سیستم به فرم رابطه ۱۲-۲

نوشته می‌شود که

$$J^T = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 & & \\ (\vec{r} \cdot \vec{b}_1 \times \bar{\lambda}_1) & \bar{\lambda}_2 & \\ & (\vec{r} \cdot \vec{b}_2 \times \bar{\lambda}_2) & \bar{\lambda}_3 \\ & & (\vec{r} \cdot \vec{b}_3 \times \bar{\lambda}_3) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \text{Diag}(m) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{xyz} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & \\ \dot{\varphi}(I_{yx}\dot{\psi} - I_{yy}\dot{\theta} + I_{yz}\dot{\varphi}) - \dot{\theta}(I_{zx}\dot{\psi} - I_{zy}\dot{\theta} + I_{zz}\dot{\varphi}) & \\ -\dot{\varphi}(-I_{xx}\dot{\psi} + I_{xy}\dot{\theta} + I_{xz}\dot{\varphi}) + \dot{\psi}(I_{zx}\dot{\psi} + I_{zy}\dot{\theta} - I_{zz}\dot{\varphi}) & \\ \dot{\theta}(I_{xx}\dot{\psi} + I_{xy}\dot{\theta} + I_{xz}\dot{\varphi}) - \dot{\psi}(I_{yx}\dot{\psi} - I_{yy}\dot{\theta} + I_{yz}\dot{\varphi}) & \end{bmatrix}$$

$$G = [0 \quad 0 \quad -mg \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$X = [x \quad y \quad z \quad \psi \quad \theta \quad \varphi]^T$$

$$T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3]^T \quad (۱۹-۳)$$

## ۴-۳ عملیات پولیشکاری

### ۱-۴-۳ طراحی و فرضیات مدل سازی

همانگونه که از اشکال ۱-۳ و ۲-۳ مشخص است، ربات در نظر گرفته شده دارای یک صفحه ثابت و یک صفحه متحرک است که در قسمت پایین صفحه متحرک، ابزار پولیشکاری و در مقابل آن، قطعه کار قرار گرفته است. بدیهی است به عنوان اولین فرض، صفحه متحرک قادر خواهد بود در محدوده ای که کشش کابل اجازه می دهد، آزادانه تحرک داشته و ابزار پولیشکاری را به قطعه کار یا نزدیک یا از آن دور سازد. هندسه در نظر گرفته شده به قسمی است که هیچ گاه دستگاه دچار خروج از حالت کارکرد نرمال نشده و حداکثر فرض ممکن این است که در صورتی که ابزار پولیشکاری قادر به شکل دهی یا سوراخ کردن و برش قطعه کار نباشد، ابزار از قطعه کار دور خواهد شد. با این مفروضات عمومی به سراغ فرضیات مربوط به ابزار می رویم که در تحلیل روابط و فرمول ها به آن استناد خواهد شد.

فرضیات مربوط به این ابزار شامل موارد زیر است [۳۲]

۱. چرخ پولیشکاری و قطعه کار، هندسه ایده آل قبل از پولیشکاری دارند.
۲. حرکت تغذیه کردن، ایده آل است.
۳. عدم تعادل محور پولیشکار دایره ای و قطعه کار، بسیار کمتر از محور چرخ پولیشکاری است.
۴. بر اساس مدل های نیروی استاتیکی موجود و تحلیل فرآیند پولیشکاری دینامیکی، پارامترهای مؤثر در نیروی دینامیکی مورد مطالعه قرار می گیرد.
۵. بر اساس مدل تغییرات دینامیکی عمق برش، فاکتور اصلی مؤثر در نیروی دینامیکی از بعد سینماتیکی محاسبه می شود.
۶. مقادیر نیرو و ضرایب تجربی محاسبه می شود.
۷. مدل نیروی دینامیکی توسط کاربرد دامنه و مقایسه محدوده به دست آورده می شود.

۸. مرکز دستگاه مختصات در نقطه  $w$  قرار دارد و قطعه کار، ثابت فرض می‌شود.

۹. ابزار با زاویه  $\alpha$  در حال چرخش است و مرکز آن با سرعت  $v_0$  حرکت می‌کند.

این مفروضات عمومی در مدل سازی دینامیکی مورد استناد خواهد بود و در صورت نقض آن ها مدل سازی تحلیل انجام شده، ممکن است در بعضی موارد اعتبار خود را از دست بدهد. مفروضات در نظر گرفته شده در عمل، کاربردی بوده و در محیط کار، رعایت آن ها کاملاً مرسوم و متداول می باشد. بنابراین فرض کردن آن ها برای مدل سازی، مشکلی نداشته و کاملاً کاربردی در نظر گرفته شده است.

### ۳-۴-۲ مدل سازی دینامیکی

مختصات مرکز ابزار در نقطه  $p = [x \ y \ z]^T$  قرار دارد با خروج از مرکز  $e = \sqrt{z^2 + y^2}$ . با استفاده از روابط ۱-۲ تا ۱۹-۲ مقدار نیروهای نرمال و مماسی به ازای  $v_w = 0.05m/s$  و  $w_E = 31HTZ$  و عمق برش  $a_p = 10mm$  و سرعت نوک ابزار  $v_s = 15m/s$  به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$F_n = [8 \quad 4.1 \quad 1.0]$$

$$F_t = [4.3 \quad 2.1 \quad 0.5] \quad (20-3)$$

که این مقادیر به ازای سه مقدار از سری فوریه  $N=1,2,3$  به دست آمده‌اند. حال، رنج نیروها و گشتاوری که به مرکز ابزار یا همان مرکز صفحه متحرک ربات وارد می‌شود، به صورت ماتریس ۳-۲۱ تعریف می‌شود

$$wrench = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad \tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]^T \quad (21-3)$$

با توجه به اینکه  $\beta$  زاویه ایست که نیروی مماسی به محور  $Z$  می‌سازد و  $r_e$  فاصله نوک ابزار تا مرکز صفحه متحرک می‌باشد، داریم:

$$F_x = F_n \quad \text{و} \quad F_y = F_t \sin \beta \quad \text{و} \quad F_z = F_t \cos \beta + m.g$$

$$\tau_x = 0 \quad \text{و} \quad \tau_y = F_z \cdot r_e \quad \text{و} \quad \tau_z = F_y \cdot r_e \quad (22-3)$$

بنابراین مؤلفه هایی از رنج خارجی که به مرکز ابزار یا صفحه متحرک وارد می شوند و توسط ربات و انسان خنثی می شوند به ترتیب عبارت اند از:

$$wrench_R = [F_y \quad F_z \quad \tau_y \quad \tau_z]^T$$

$$wrench_H = [F_x]$$

که اندیس R و H به ترتیب بیانگر ربات و انسان می باشند. در صورت چرخشی بودن ابزار، گشتاور، حول محور x ایجاد می شود.

در نتیجه در حالت ایستا، معادله تعادل نیرو در رابطه ۳-۱۳ به صورت رابطه ۳-۲۳ تغییر می کند.

$$\sum_{i=3}^3 \lambda_i T_i' - mg \hat{K} - F_e = 0 \quad (23-3)$$

که  $F_e$  بردار نیروهای خارجی در دستگاه مختصات مطلق بوده و  $T_i'$  مقدار کشش کابل i ام در ربات کابلی در حالت وجود بارگذاری خارجی است. که این نیرو، همان نیروی خارجی اعمال شده به ربات کابلی موازی می باشد.

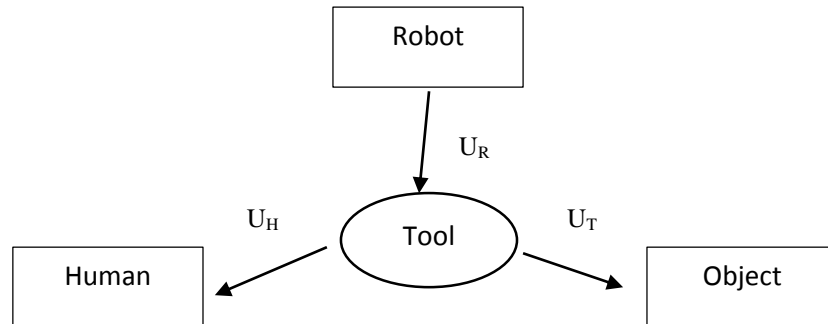
### ۳-۴-۳ تعامل انسان و ربات

شکل ۳-۴ عملکرد انسان و ربات روی قطعه کار را به صورت شماتیک نشان می دهد [۳۵]. مقادیر ورودی انسان و ربات که بردارهایی شامل نیرو و گشتاور هستند را به صورت بردارهای ۳-۲۴ و ۳-۲۵ بیان می کنیم.

$$u_H = (f_{Hx}, f_{Hy}, f_{Hz}, \tau_{H\alpha}, \tau_{H\beta}, \tau_{H\gamma})^T \quad (24-3)$$

$$u_R = (f_{Rx}, f_{Ry}, f_{Rz}, \tau_{R\alpha}, \tau_{R\beta}, \tau_{R\gamma})^T \quad (25-3)$$

اندیس H مربوط به اپراتور انسان و اندیس R مربوط به ربات است.



شکل ۳-۴ عملکرد انسان و ربات بر روی جسم

موقعیت شکل نهایی که توسط ابزار ربات و نیروی انسان روی قطعه کار ایجاد می‌شود در رابطه ۳-۲۶ تعریف شده است.

$$u_T = (x_T, y_T, z_T, \alpha_T, \beta_T, \gamma_T)^T \quad (26-3)$$

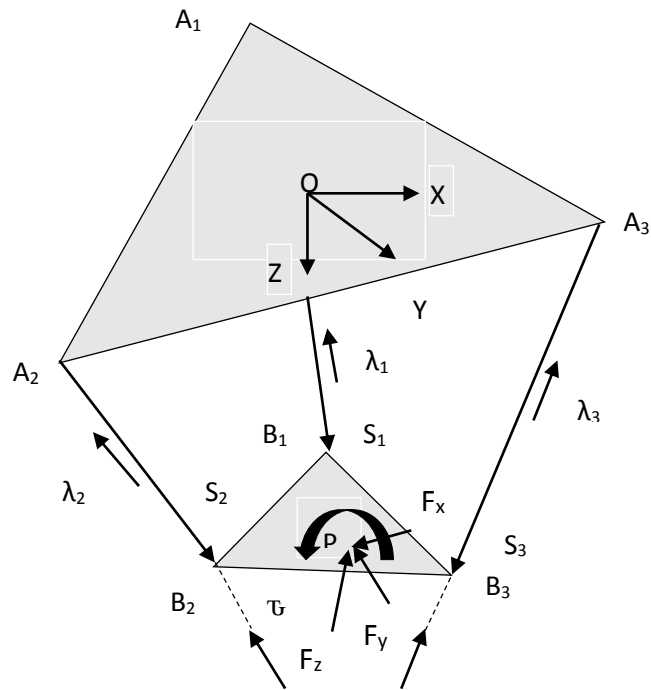
رابطه بر هم کنش انسان و ربات به صورت ۳-۲۷ نشان داده می‌شود:

$$u_T = k(u_R, u_H) \quad (27-3)$$

که k، یک اپراتور غیرخطی است.

یک ربات کابلی فضایی که تحت اثر بارهای خارجی قرار گرفته در شکل ۳-۵ نشان داده شده است





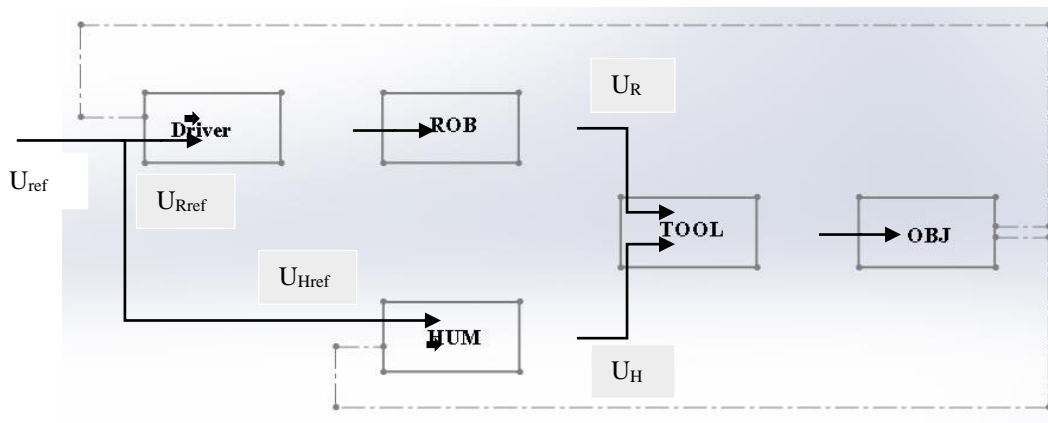
شکل ۳-۵ ربات کابلی فضایی تحت بارگذاری و گشتاور خارجی

برای مدل نشان داده شده در شکل ۳-۵ فرم بسته معادلات به صورت رابطه ۳-۲۸ می باشد [۳۶].

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + G + \tau_l = J^T T \quad (3-28)$$

که با توجه به روابط دینامیک به دست آمده برای ربات کابلی صفحه ای در بخش ۲-۲-۴ و تعمیم آن به ربات کابلی فضایی، مقادیر ماتریس ها به صورت روابط ۲-۱۶ می باشد و ماتریس  $\tau_l$  همان رنج نیروها و گشتاوری است که از رابطه ۳-۲۱ حاصل می شود.

کل سیستم در یک بلوک دیاگرام به صورت شکل ۳-۶ توصیف می شود



شکل ۳-۶ بلوک دیاگرام سیستم

RUB: ربات      HUM: انسان      OBJ: جسم      Driver: محرک

بردار ورودی به ربات با  $u_{pref}$  در شکل نشان داده شده است که ما با  $u_{Rref}$  بیان می کنیم:

$$u_{Rref} = (v_{Rrefy}, f_{Rrefy}, f_{Rrefz}, v_{Rrefz})^T \quad (3-29)$$

که  $v$ ، سرعت ابزار و  $f$ ، نیرو می باشد. انسان در صفحه  $y-z$  حرکت می کند و ربات، تنها در راستای  $z$  نیروها که شامل وزن ابزار نیز می شود را تحمل می کند و عمق برش ناشی از نیروی انسان که همان نیروی نرمال در نظر گرفته شده است می باشد.

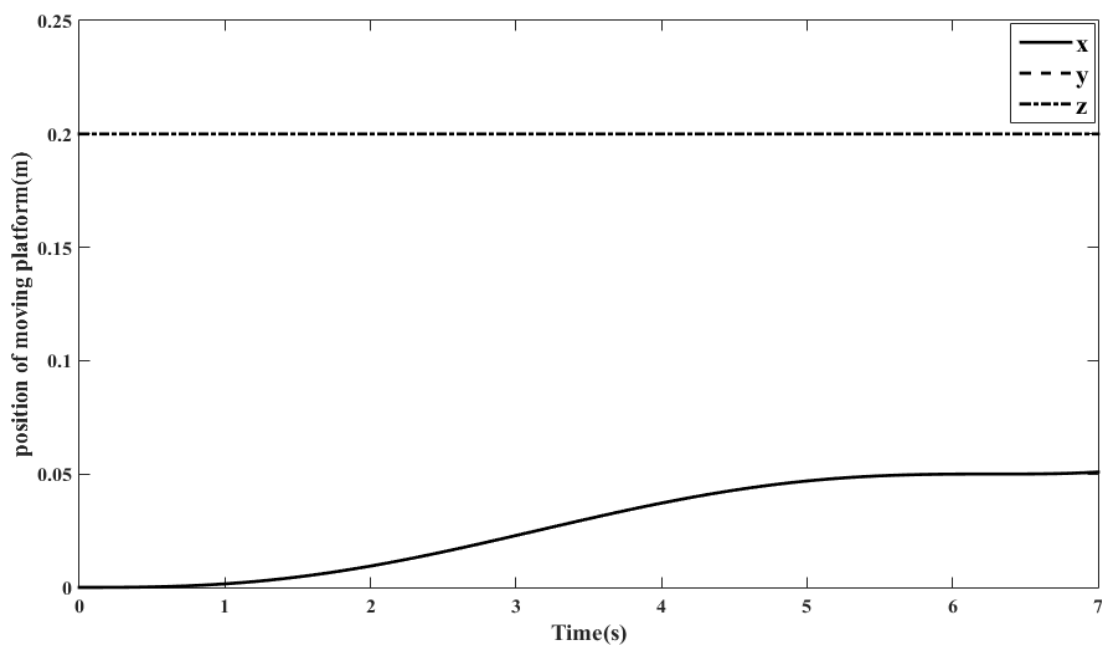
### ۳-۵ شبیه سازی

**مثال ۱-** در این مثال برای حرکت ربات موازی کابلی فضایی بدون اعمال نیروی اپراتور و پولیشکاری، برای حرکت روی مسیر مشخص بر حسب زمان، کشش کابلها، زوایای صفحه متحرک، سرعت محور و گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابلها در طول زمان حرکت به دست می آید. با مشخص بودن مسیر حرکت، برای به دست آوردن کشش کابلها و زوایای صفحه متحرک از فرم بسته دینامیکی رابطه ۲-۱۲ استفاده می شود و ماتریسها از رابطه ۳-۱۹ محاسبه می گردد. با به دست آمدن زوایا و مشخص بودن موقعیت مرکز صفحه متحرک، از رابطه ۳-۸ طول کابلها محاسبه می گردد و از روی

طول کابل‌ها زوایای موتور به دست می‌آید. با داشتن زوایای موتور و کشش کابل‌ها در هر لحظه می‌توان گشتاور تولیدی موتور را از رابطه ۳-۳۰ به دست آورد.

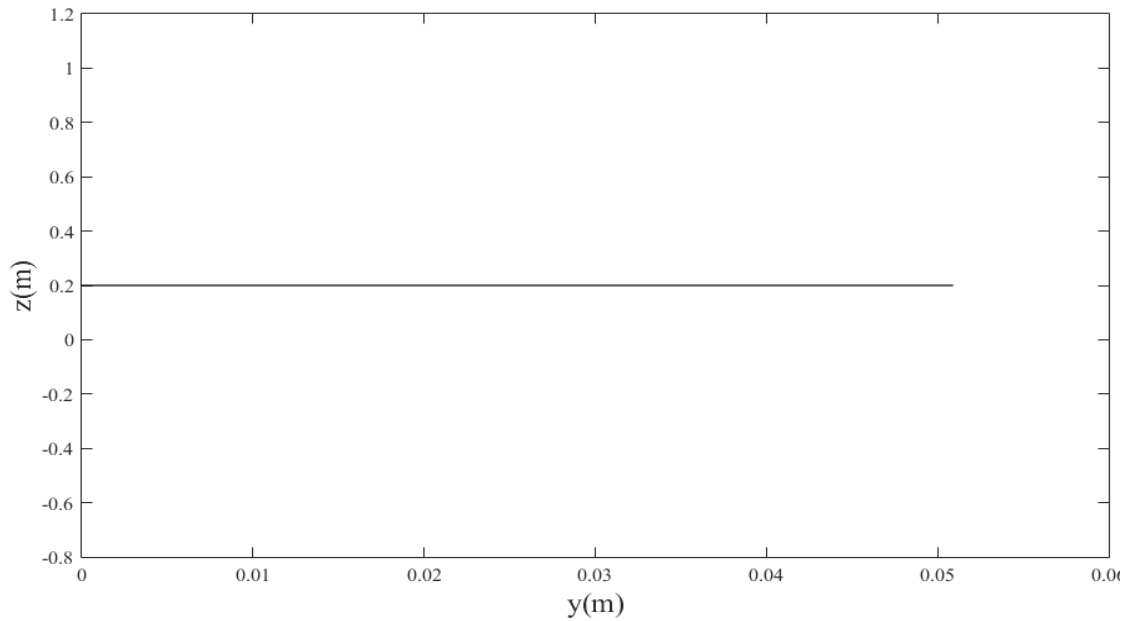
$$\tau = rT + c\dot{\theta}_m + J\ddot{\theta}_m \quad (3-30)$$

که  $r$  شعاع پولی،  $J$  اینرسی دورانی محور موتور و  $c$  ضریب اصطکاک ویسکوز محور موتور می‌باشد. مسیر حرکت بر حسب زمان در شکل ۳-۷ داده شده است.



شکل ۳-۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان

و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه  $Z-Y$  بصورت شکل ۳-۸ نشان داده می‌شود



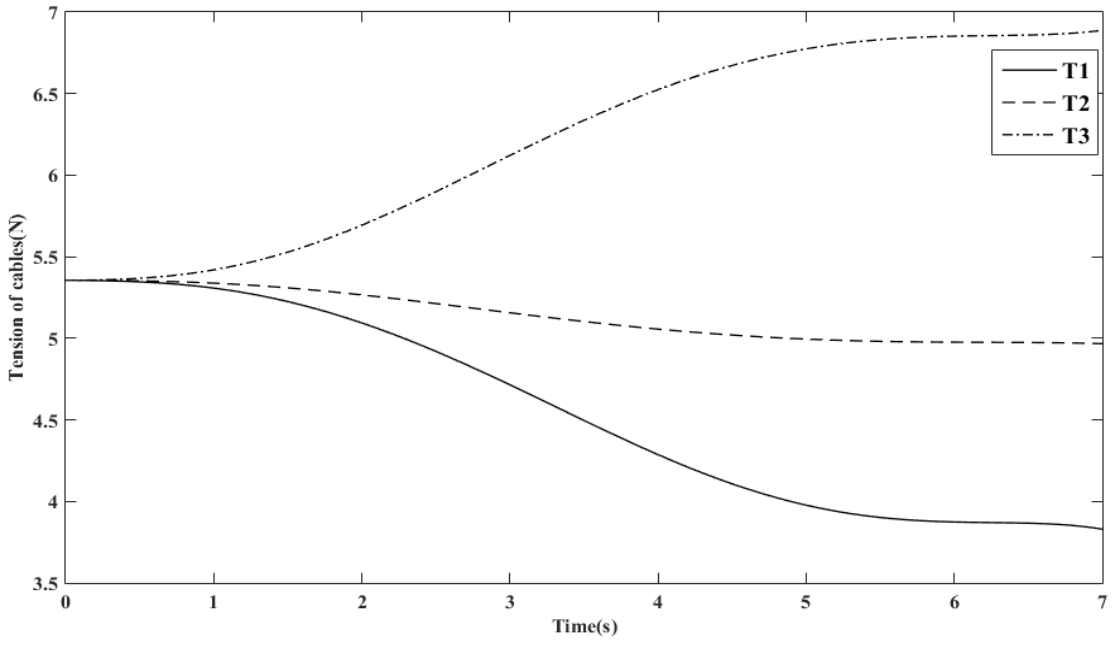
شکل ۳-۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-y

برای سیستم با پارامترهای جدول ۳-۱ و مسیر حرکت شکل ۳-۷

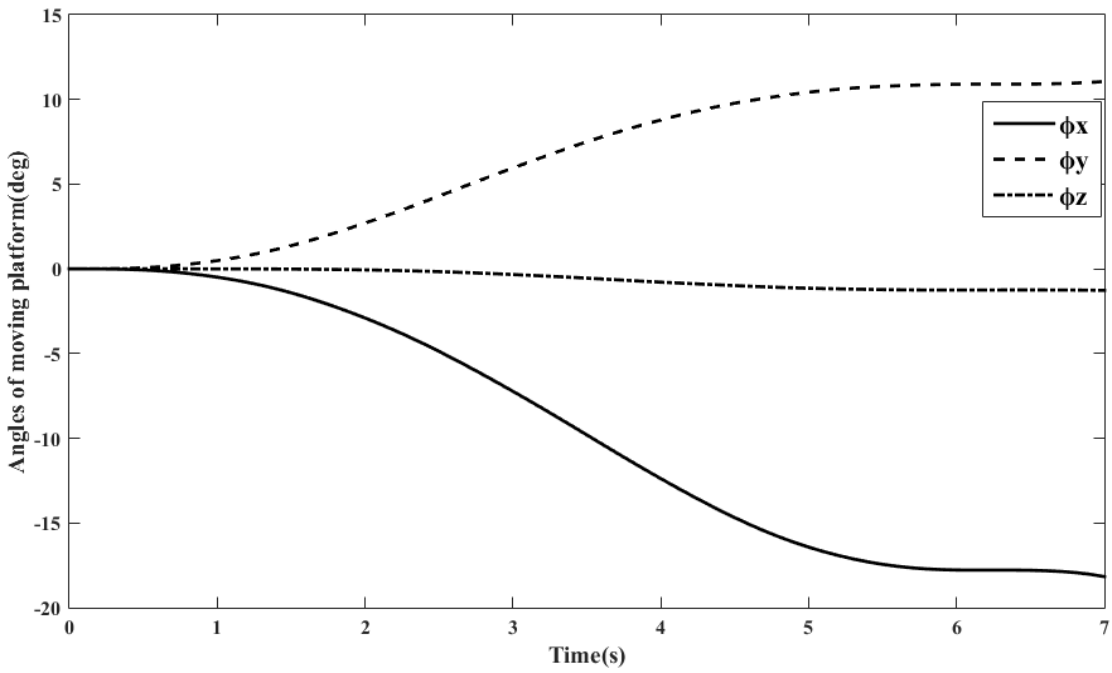
جدول ۳-۱ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی

واحد	مقدار	پارامتر
m	$D=0.5$	طول ضلع صفحه ثابت
m	$d=0.5$	طول ضلع صفحه متحرک
kg	$m=1$	جرم صفحه متحرک
$\text{kg.m}^2$	$J=10^{-3}$	اینرسی دورانی محور موتورهای کشنده کابلها
$\text{N.m.s/rad}$	$c=0.2$	ضریب اصطکاک ویسکوز
m	$r_p=0.1$	شعاع پولی
$\text{kg.m}^2$	$I_{xx}=I_{yy}=4/568 * 10^{-3}$ $I_{zz}=9/134 * 10^{-3}$	اینرسی دورانی صفحه متحرک

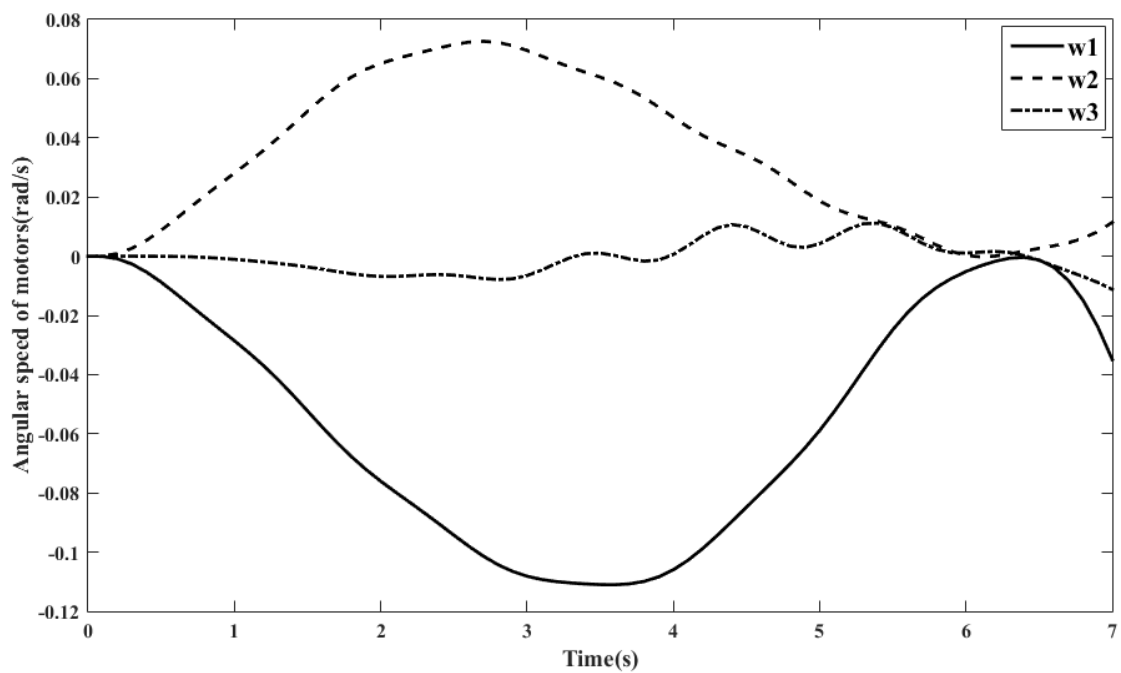
نتایج به صورت زیر حاصل می گردد



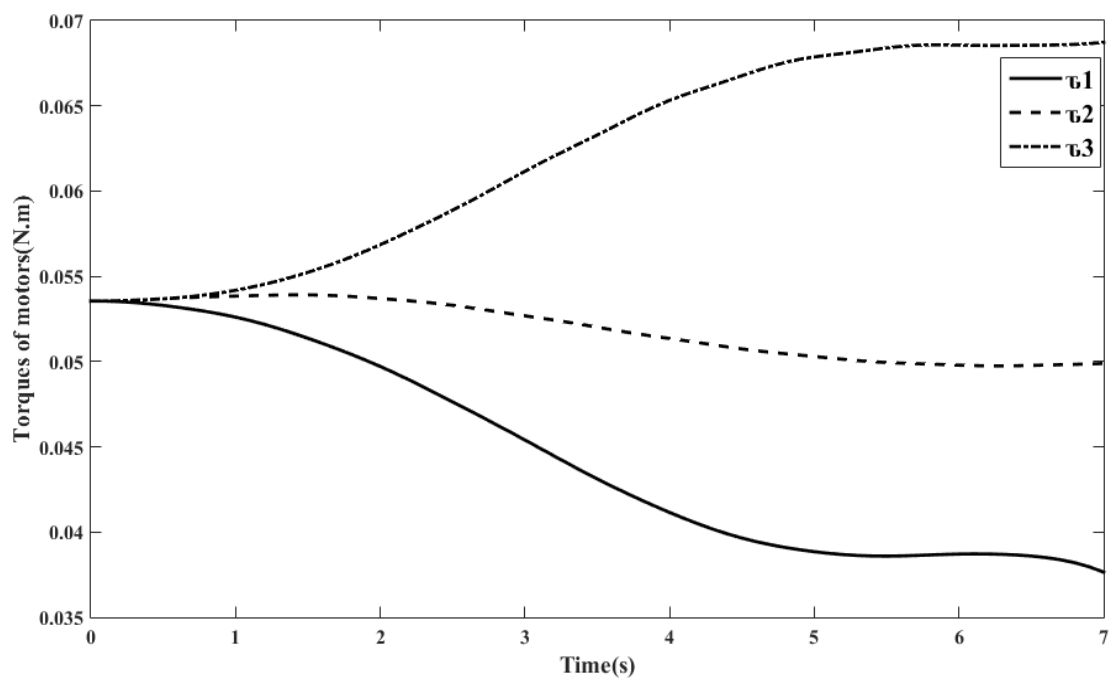
شکل ۳-۹ مقادیر کشش کابل‌ها



شکل ۳-۱۰ مقادیر زوایای صفحه متحرک

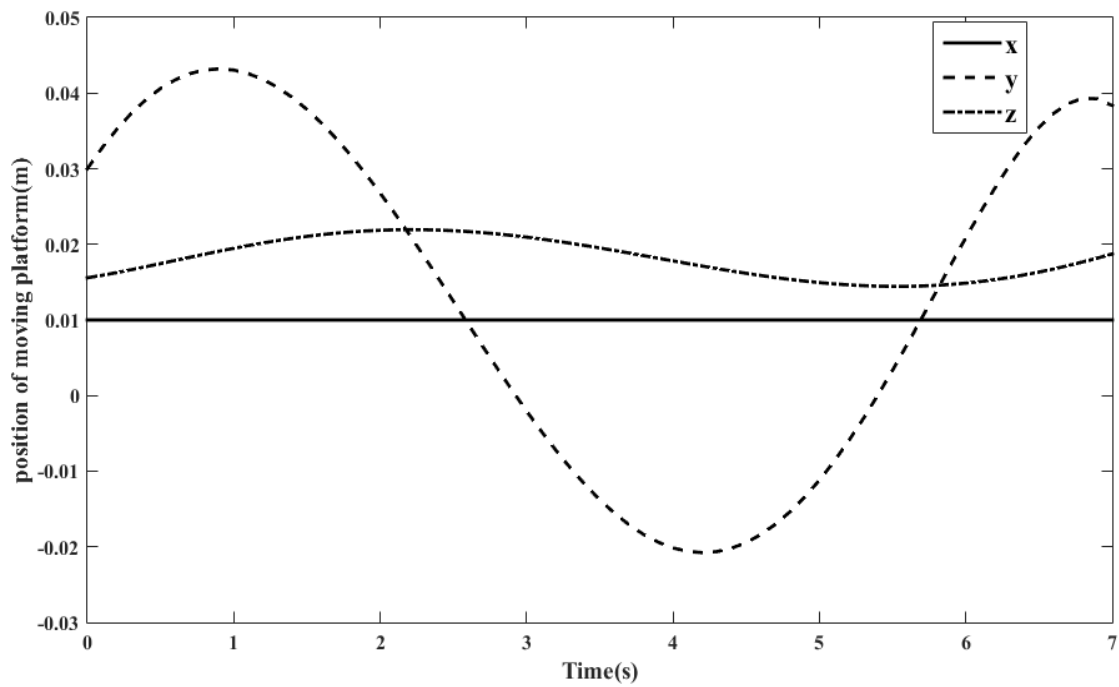


شکل ۱۱-۳ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها



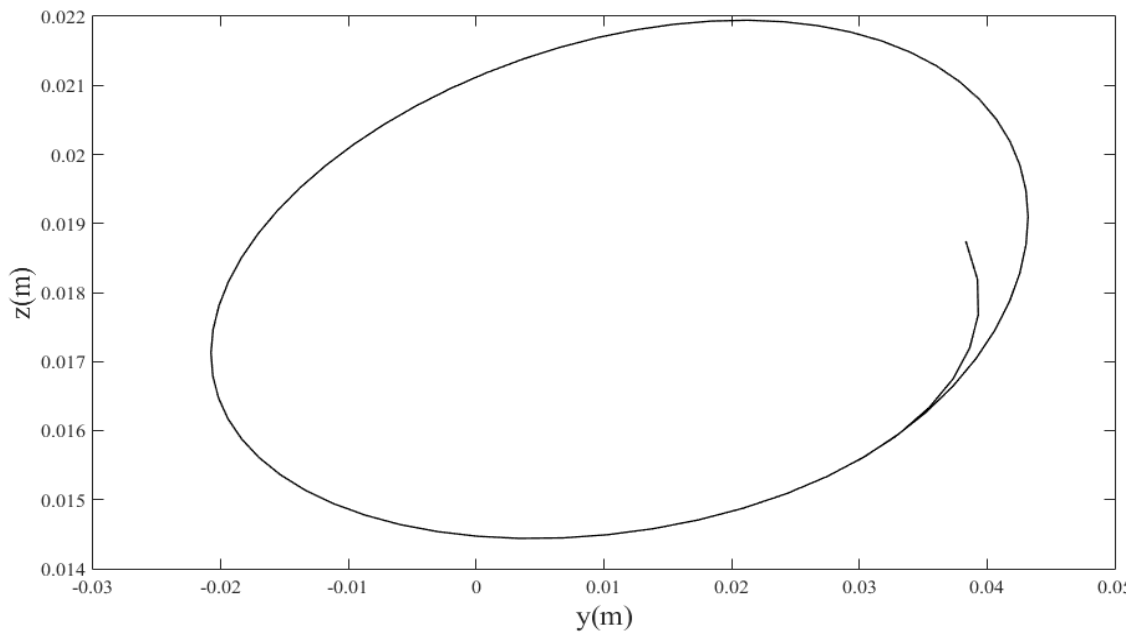
شکل ۱۲-۳ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

مثال ۲- تغییر مسیر مطابق شکل ۳-۱۳



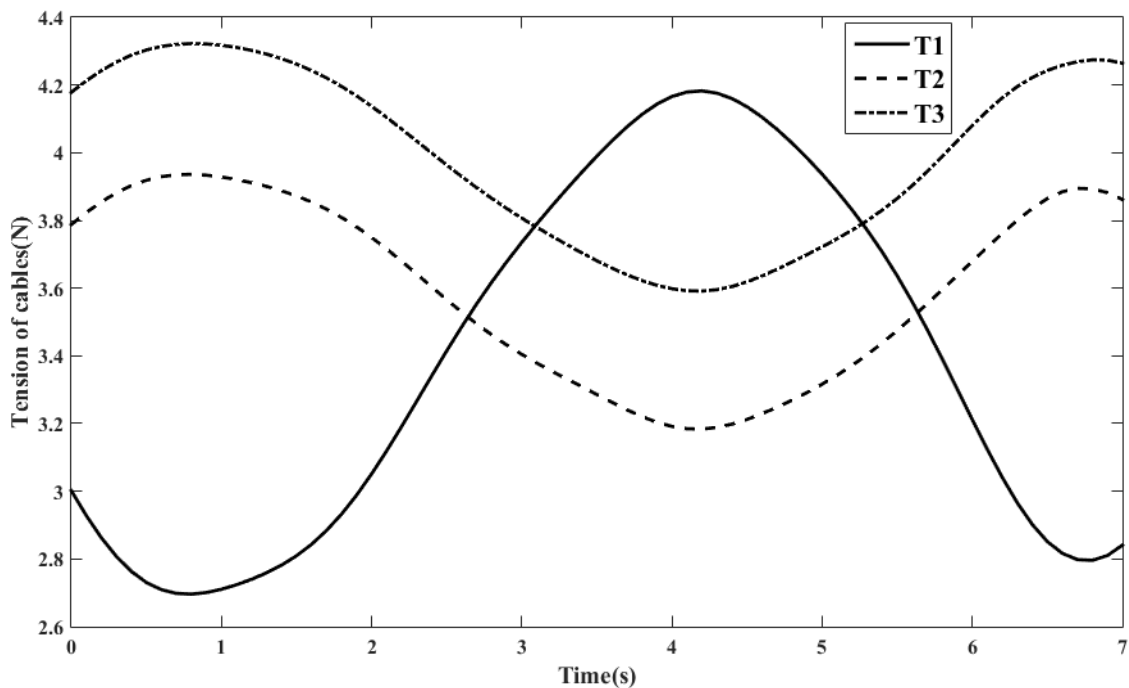
شکل ۳-۱۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان

و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه Z-Y بصورت شکل ۳-۱۴ نشان داده می شود.

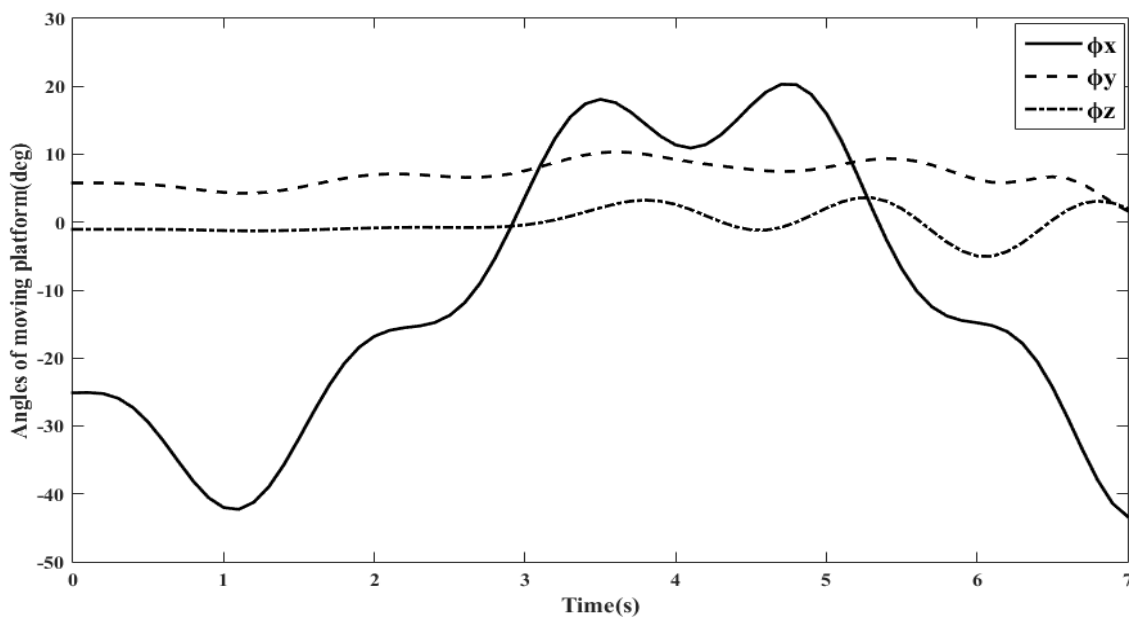


شکل ۳-۱۴ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y

برای سیستم با پارامترهای جدول ۳-۱ و مسیر حرکت شکل ۳-۱۳، نتایج به صورت زیر حاصل می گردد.

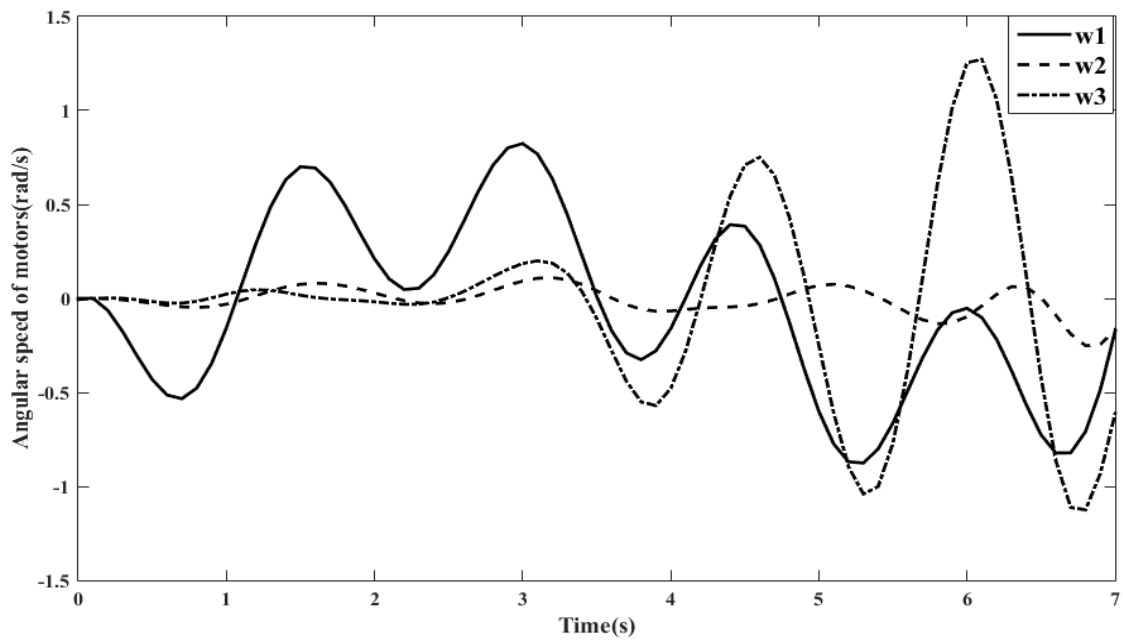


شکل ۳-۱۵ مقادیر کشش کابل‌ها

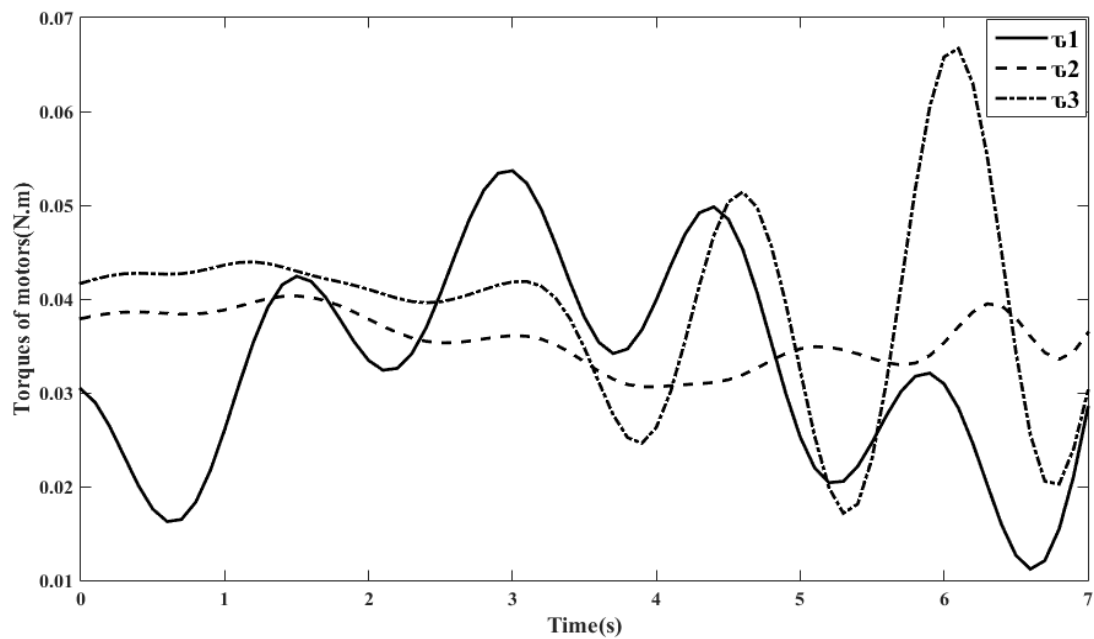


شکل ۳-۱۶ مقادیر زوایای صفحه متحرک



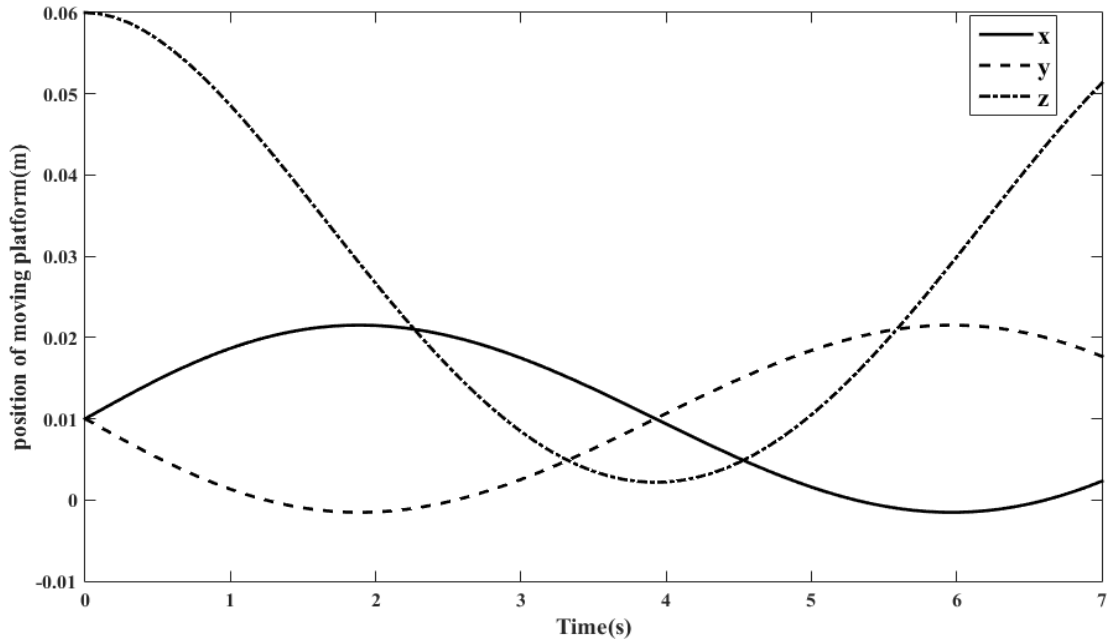


شکل ۳-۱۷ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها



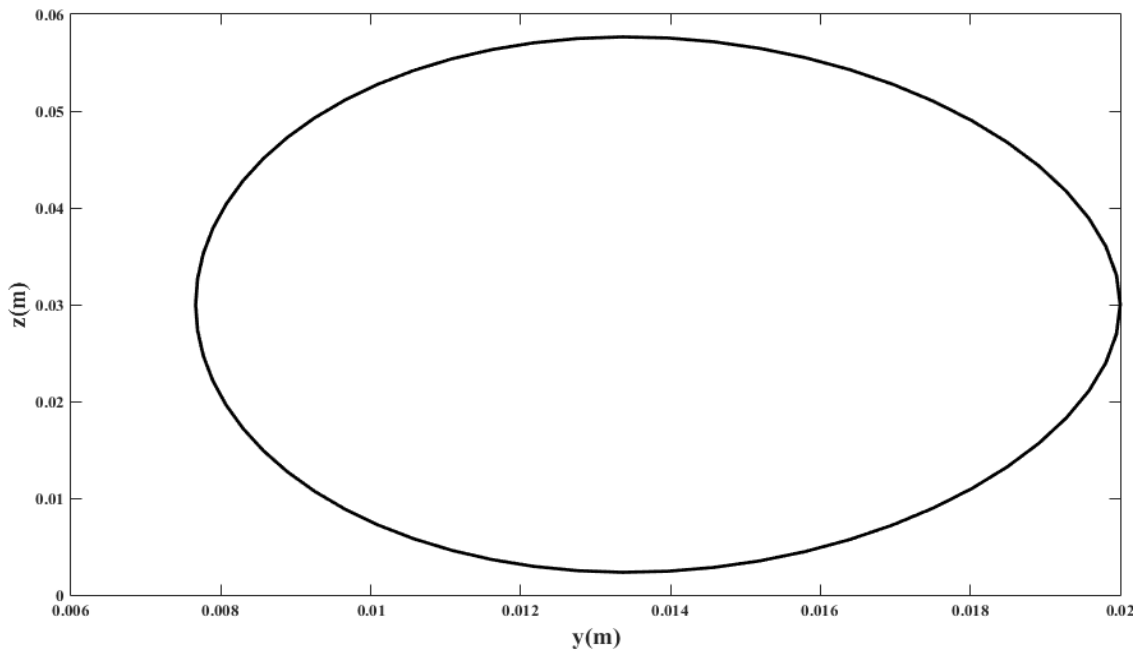
شکل ۳-۱۸ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

مثال ۳- تغییر مسیر مطابق شکل ۳-۱۷



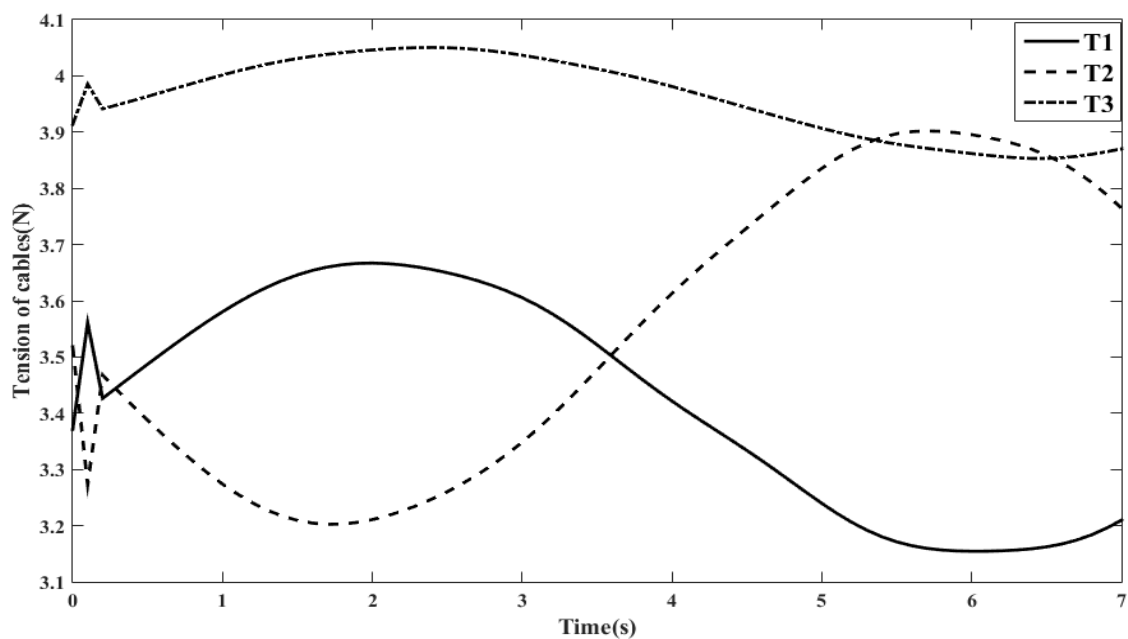
شکل ۳-۱۹ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان

و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه Z-y بصورت شکل ۳-۲۰ نشان داده می شود

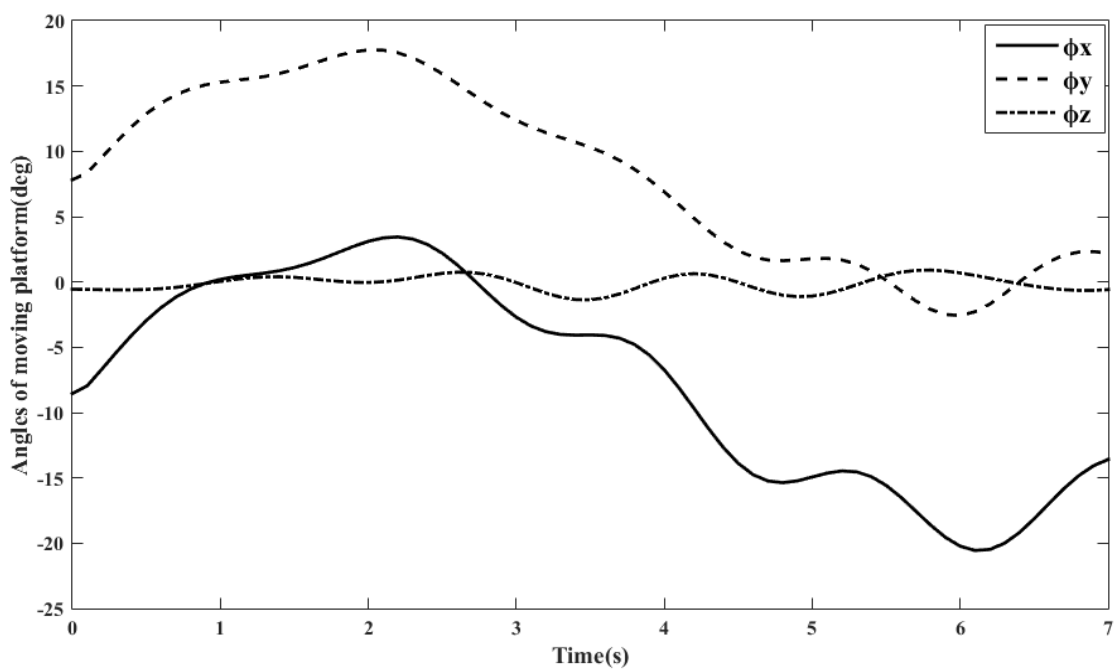


شکل ۳-۲۰ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-y

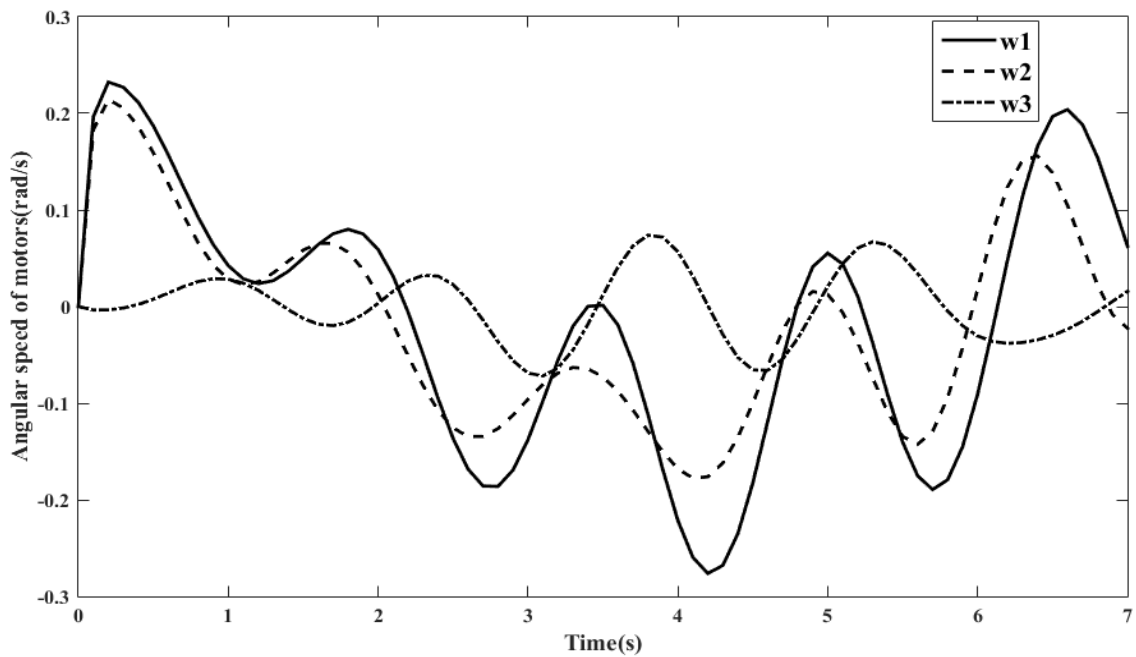
برای سیستم با پارامترهای جدول ۱-۳ و مسیر حرکت شکل ۳-۱۹، نتایج به صورت زیر حاصل می‌گردد.



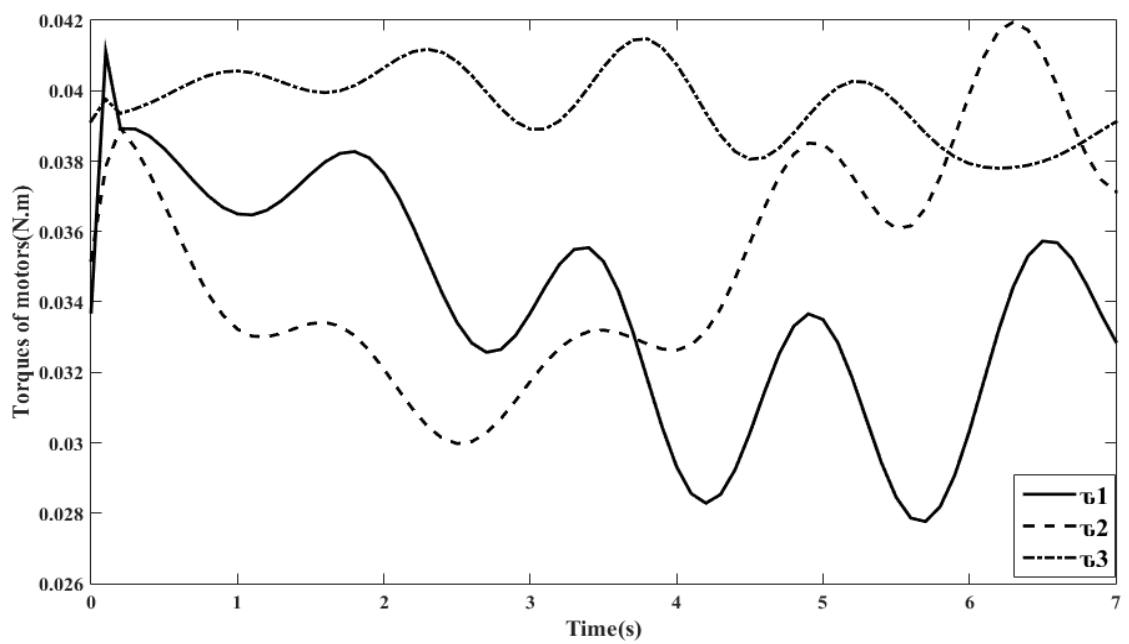
شکل ۳-۲۱ مقادیر کشش کابل‌ها



شکل ۳-۲۲ مقادیر زوایای صفحه متحرک

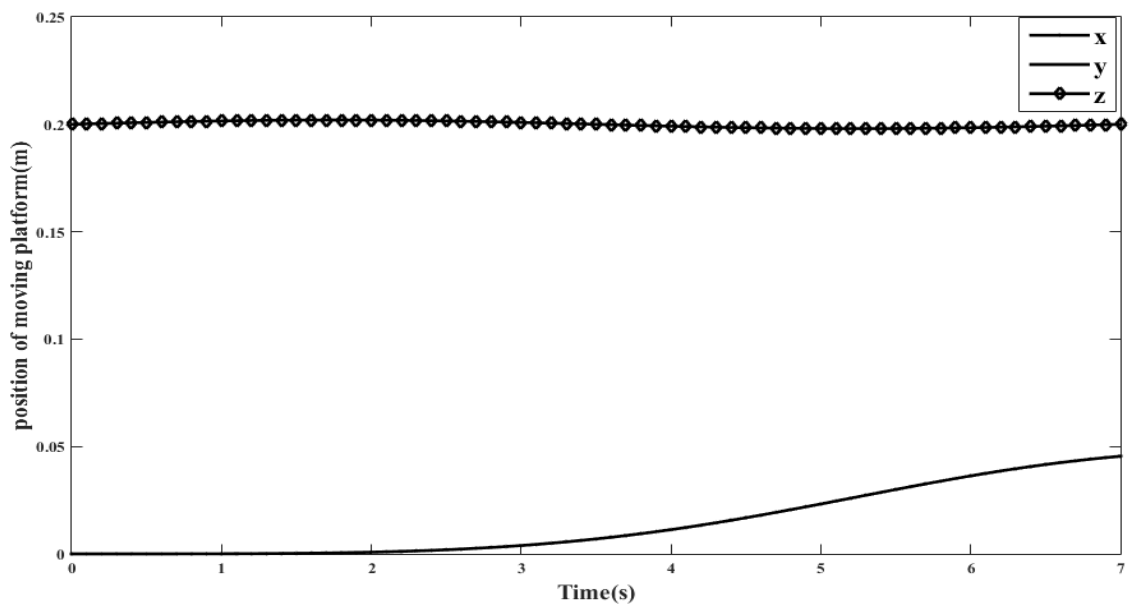


شکل ۳-۲۳ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها

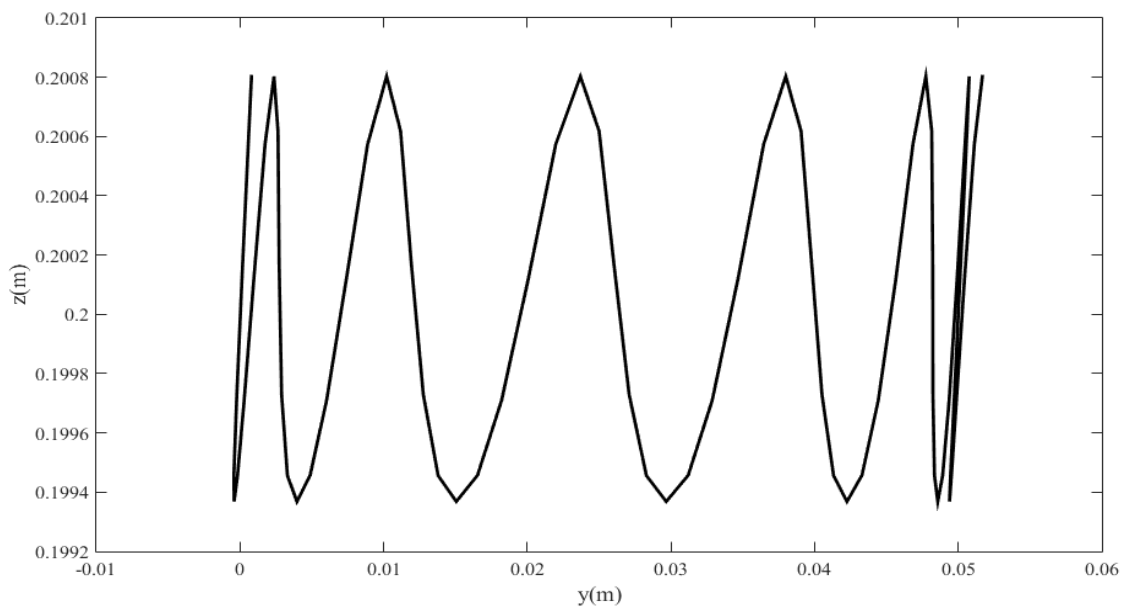


شکل ۳-۲۴ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

مثال ۴- مسیر مثال ۱ تحت بارگذاری ذکر شده در رابطه ۳-۲۰ بر حسب زمان به شکل ۳-۲۵ تغییر می کند



شکل ۳-۲۵ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان پس از اعمال نیرو و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه Z-y بصورت شکل ۳-۲۶ نشان داده می شود

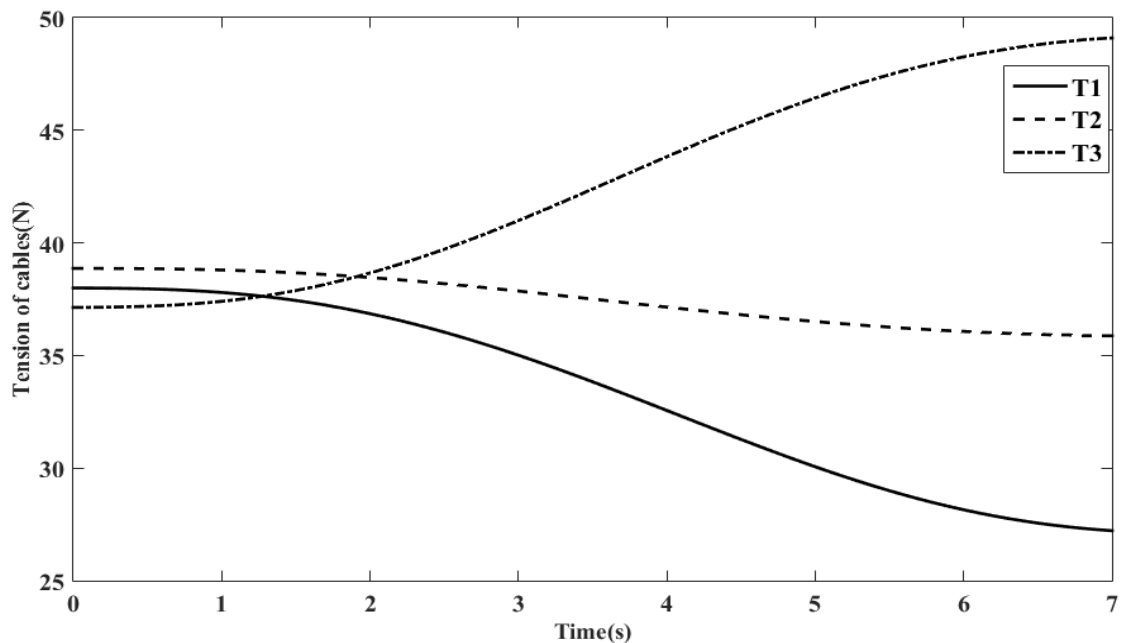


شکل ۳-۲۶ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-y

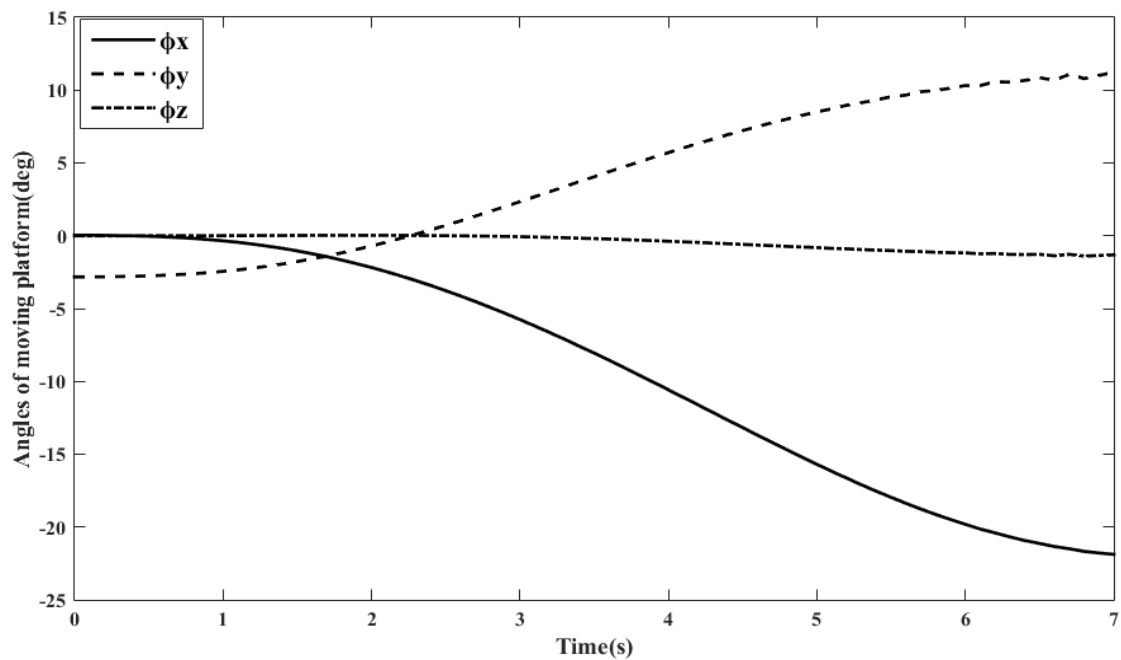
جدول ۲-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی

واحد	مقدار	پارامتر
m	$D=0.5$	طول ضلع صفحه ثابت
m	$d=0.05$	طول ضلع صفحه متحرک
kg	$m=8$	جرم صفحه متحرک و ابزار
m	$r=0.05$	طول ابزار
HTZ	$M=31$	فرکانس حرکت ابزار
rad/s	$w=1$	سرعت ابزار
$kg.m^2$	$J=10^{-3}$	اینرسی دورانی محور موتورهای کشنده کابل‌ها
N.m.s/rad	$c=0.02$	ضریب اصطکاک ویسکوز
m	$r_p=0.01$	شعاع پولی
$kg.m^2$	$I_{xx}=I_{yy}=4/568 * 10^{-3}$ $I_{zz}=9/134 * 10^{-3}$	اینرسی دورانی صفحه متحرک

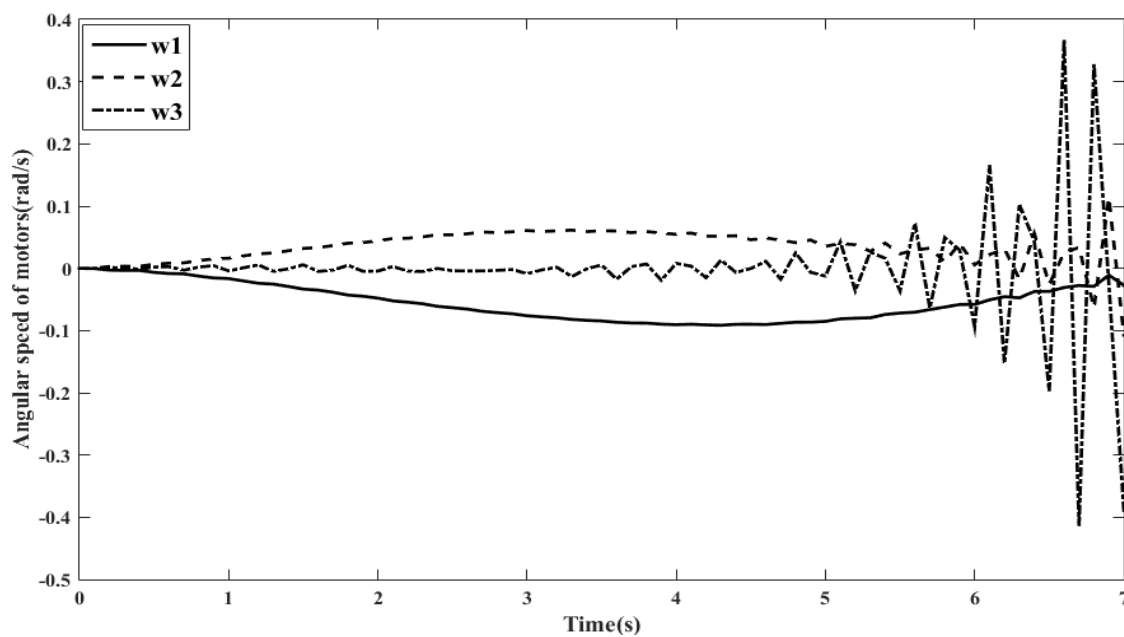
برای سیستم با پارامترهای جدول ۲-۳ و مسیر حرکت شکل ۳-۲۵، نتایج به صورت زیر حاصل می‌گردد



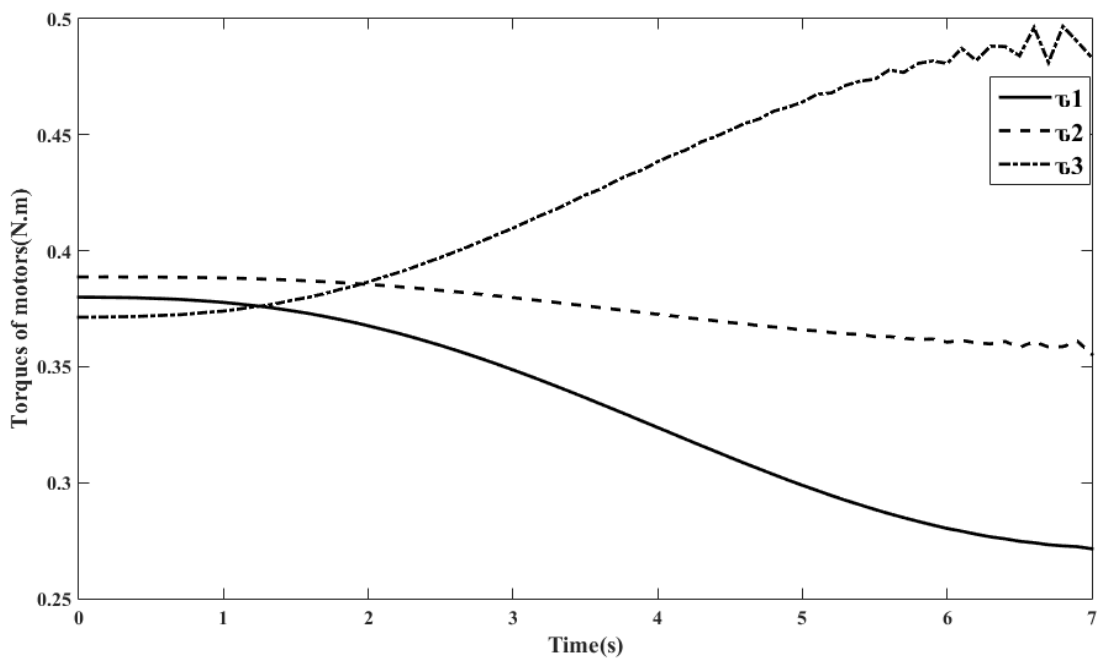
شکل ۳-۲۷ مقادیر کشش کابل‌ها



شکل ۲۸-۳ مقادیر زوایای صفحه متحرک

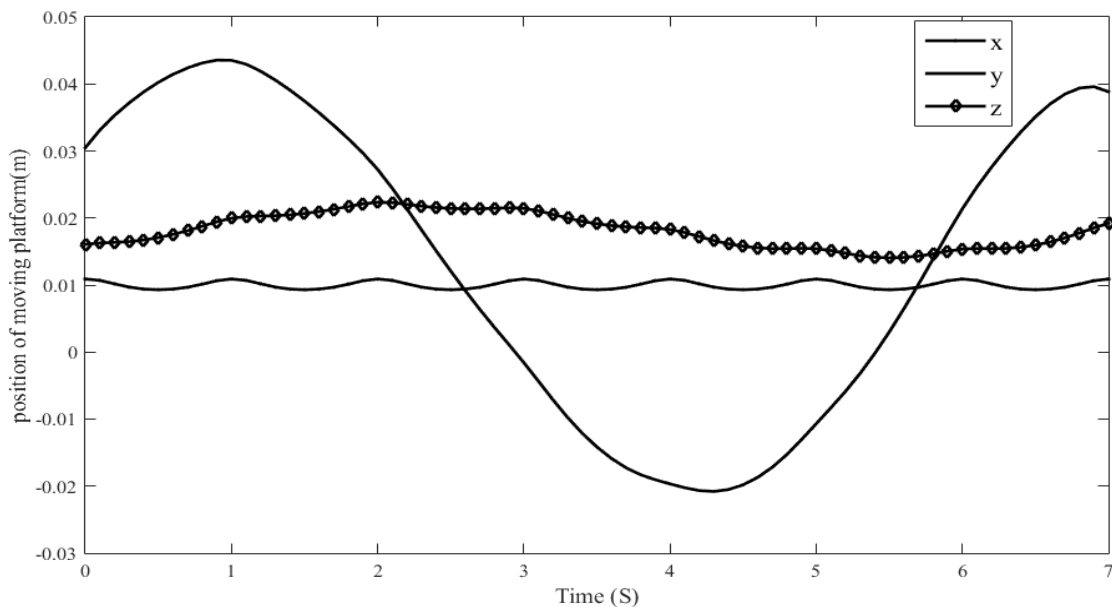


شکل ۲۹-۳ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها



شکل ۳۰-۳ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

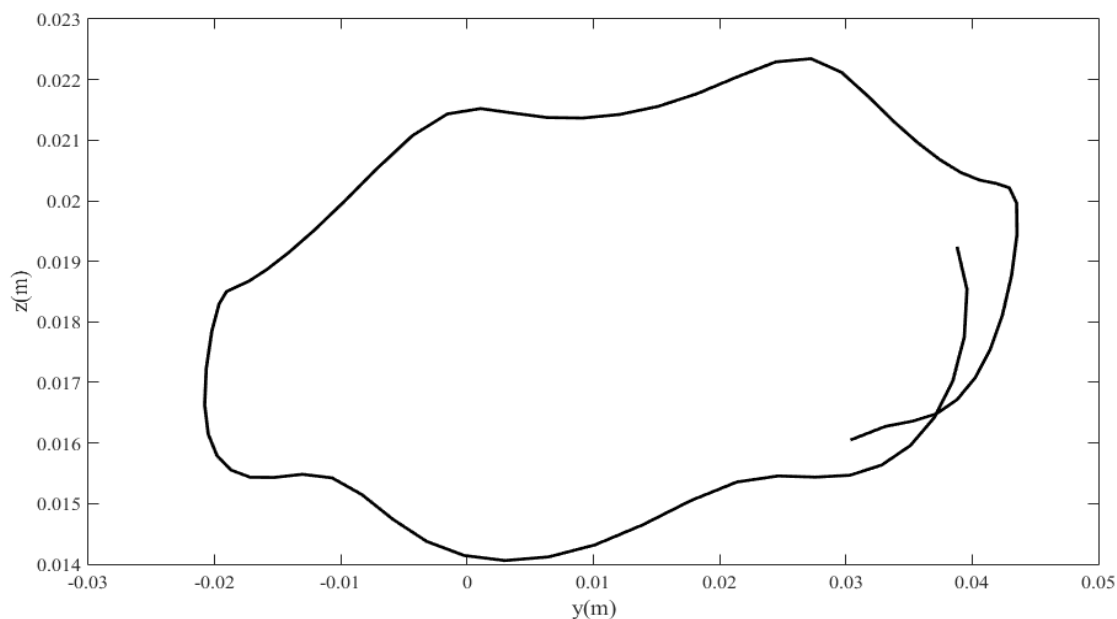
مثال ۵- مسیر مثال ۲ تحت بارگذاری ذکر شده در رابطه ۳-۲۰ بر حسب زمان به شکل ۳۱-۳ تغییر می‌کند.



شکل ۳۱-۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان پس از اعمال نیرو

و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه Z-Y بصورت شکل ۳۲-۳ نشان داده می‌شود



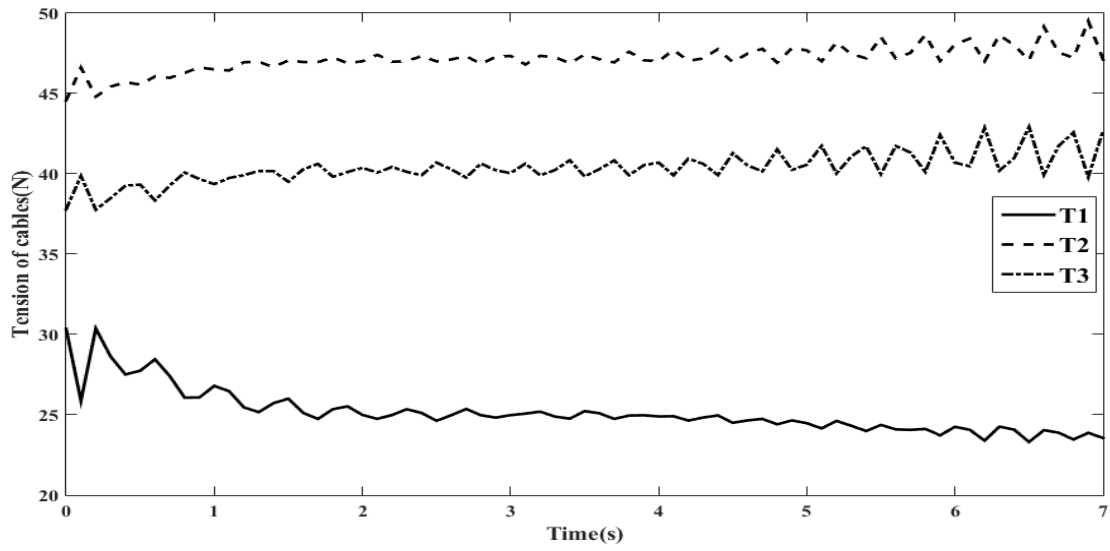


شکل ۳-۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y

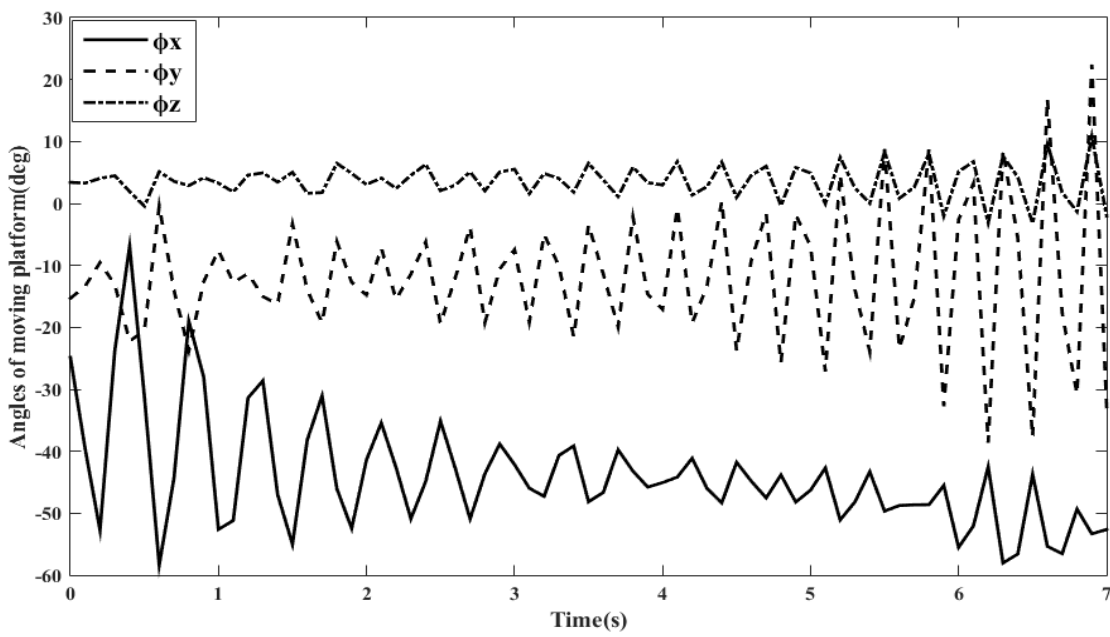
جدول ۳-۳ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی

واحد	مقدار	پارامتر
m	$D=0/5$	طول ضلع صفحه ثابت
m	$d=0/05$	طول ضلع صفحه متحرک
kg	$m=10$	جرم صفحه متحرک و ابزار
m	$r=0,05$	طول ابزار
HTZ	$M=31$	فرکانس حرکت ابزار
rad/s	$w=1$	سرعت ابزار
kg.m <sup>2</sup>	$J=10^{-3}$	اینرسی دورانی محور موتورهای کشنده کابل‌ها
N.m.s/rad	$c=0/02$	ضریب اصطکاک ویسکوز
m	$r_p=0/01$	شعاع پولی
kg.m <sup>2</sup>	$I_{XX}=I_{yy}=4/568 * 10^{-3}$ $I_{zz}=9/134 * 10^{-3}$	اینرسی دورانی صفحه متحرک

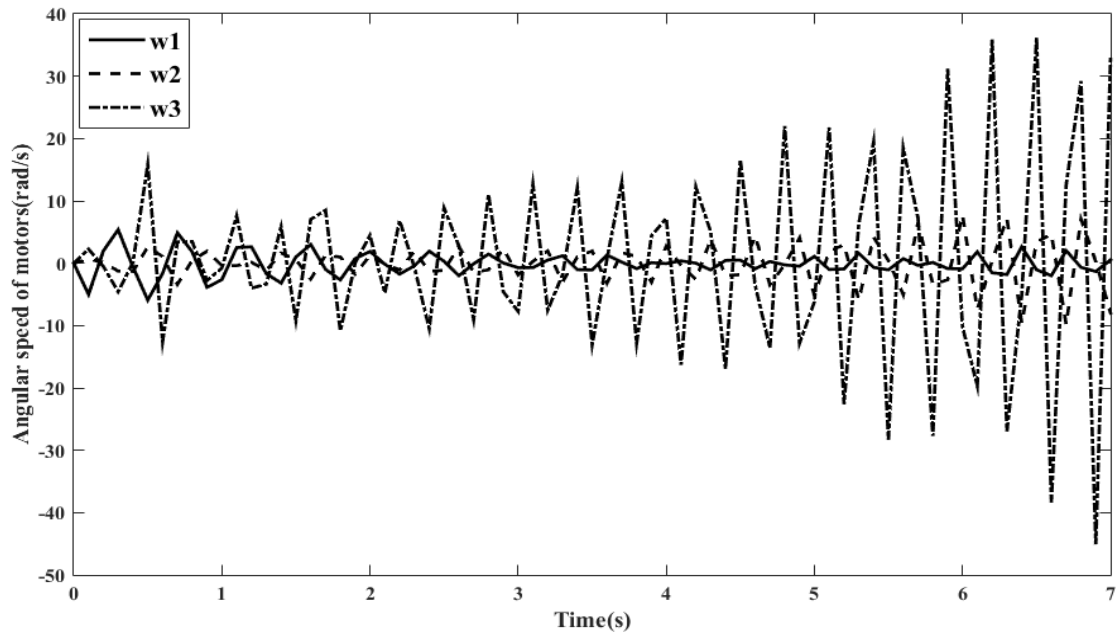
برای سیستم با پارامترهای جدول ۳-۳ و مسیر حرکت شکل ۳-۳، نتایج به صورت زیر حاصل می‌گردد



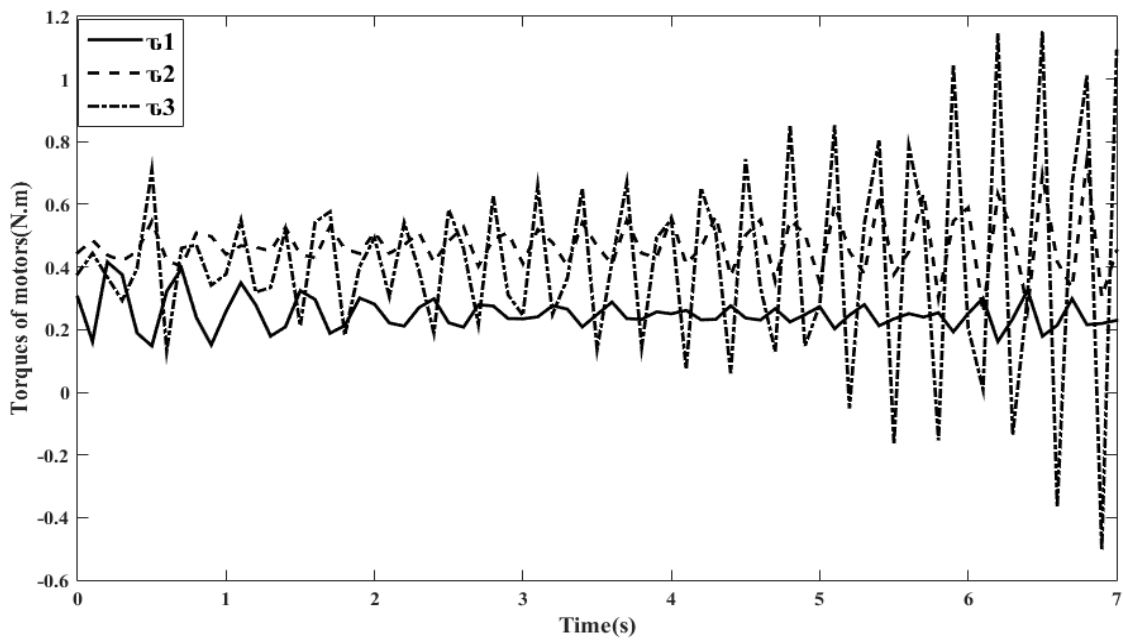
شکل ۳-۳۳ مقادیر کشش کابل‌ها



شکل ۳-۳۴ مقادیر زوایای صفحه متحرک

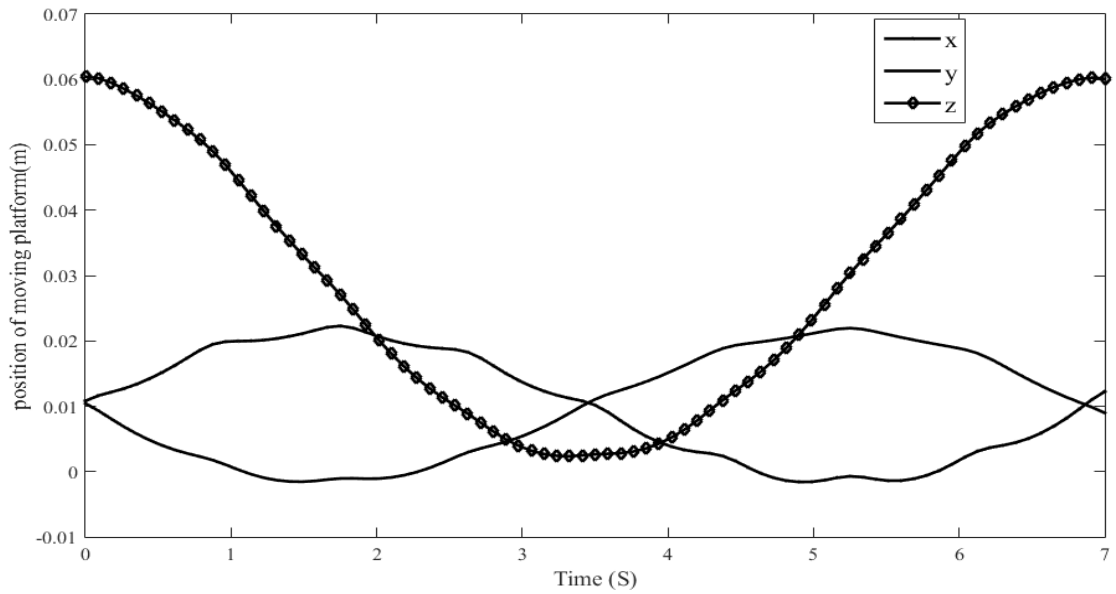


شکل ۳-۳۵ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها



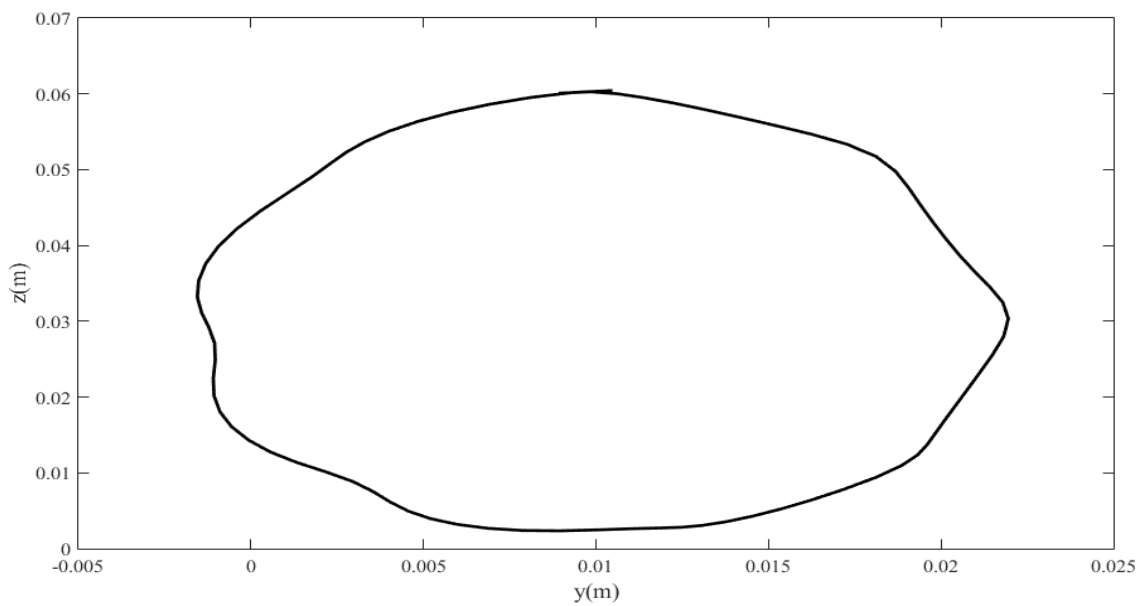
شکل ۳-۳۶ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

مثال ۶- مسیر مثال ۳ تحت بارگذاری ذکر شده در رابطه ۳-۲۰ بر حسب زمان به شکل ۳-۳۷ تغییر می کند



شکل ۳-۳۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان پس از اعمال نیرو

و مسیر حرکت بر حسب مکان در صفحه Z-Y بصورت شکل ۳-۳۸ نشان داده می شود

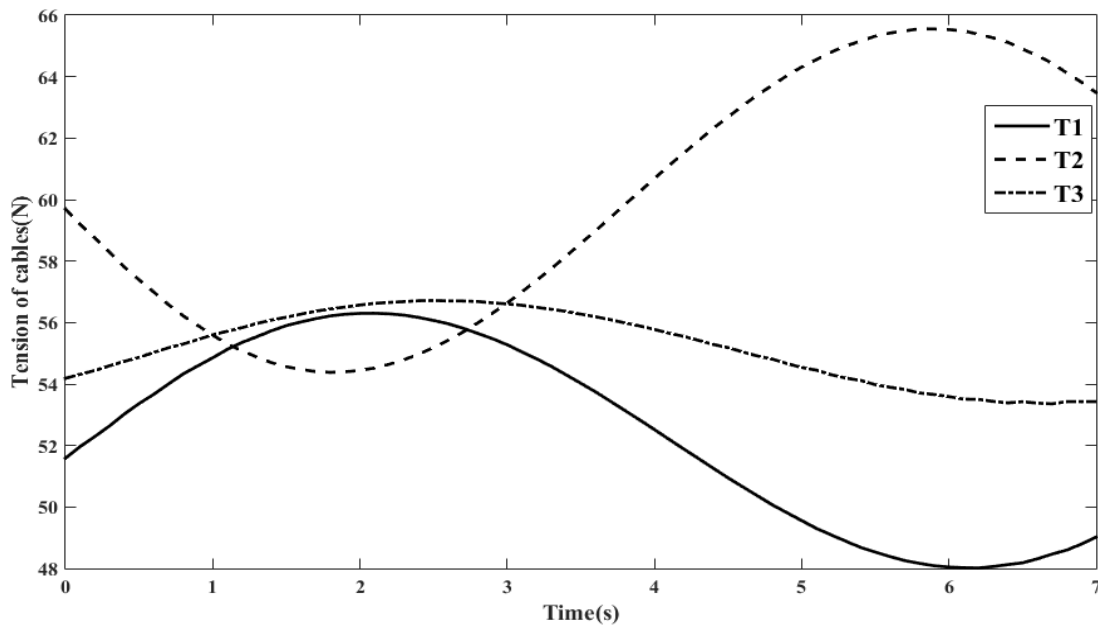


شکل ۳-۳۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y

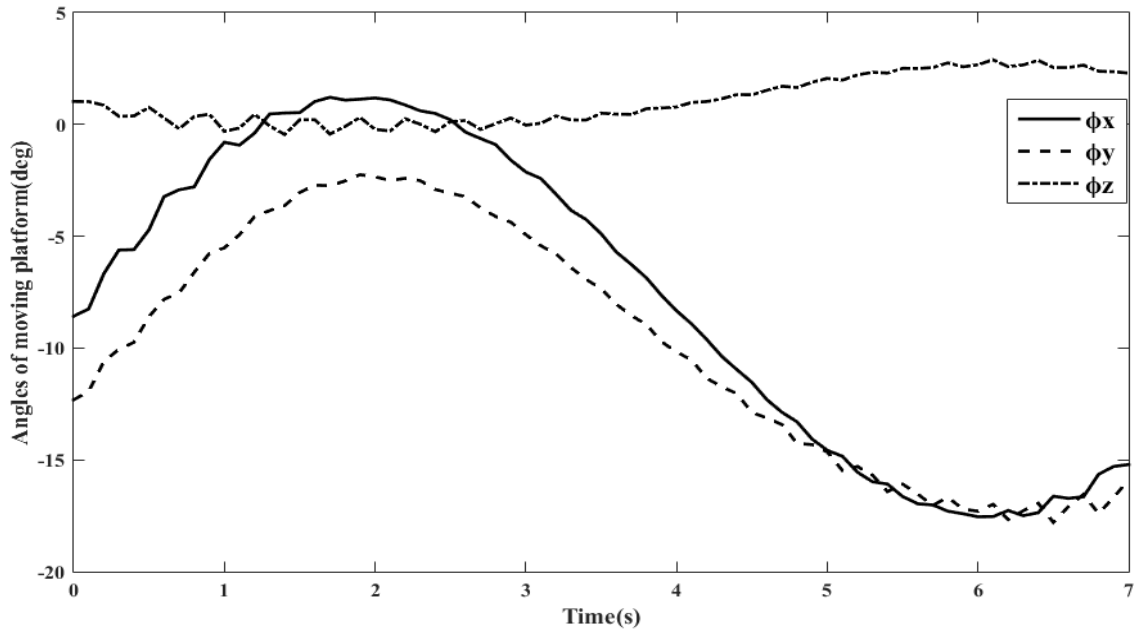
جدول ۳-۴ پارامترهای ربات موازی کابلی فضایی

واحد	مقدار	پارامتر
m	$D=0.5$	طول ضلع صفحه ثابت
m	$d=0.05$	طول ضلع صفحه متحرک
kg	$m=15$	جرم صفحه متحرک و ابزار
m	$r=0.05$	طول ابزار
HTZ	$M=31$	فرکانس حرکت ابزار
rad/s	$w=1$	سرعت ابزار
kg.m <sup>2</sup>	$J=10^{-3}$	اینرسی دورانی محور موتورهای کشنده کابل‌ها
N.m.s/rad	$c=0.02$	ضریب اصطکاک ویسکوز
m	$r_p=0.01$	شعاع پولی
kg.m <sup>2</sup>	$I_{xx}=I_{yy}=4/568 * 10^{-3}$ $I_{zz}=9/134 * 10^{-3}$	اینرسی دورانی صفحه متحرک

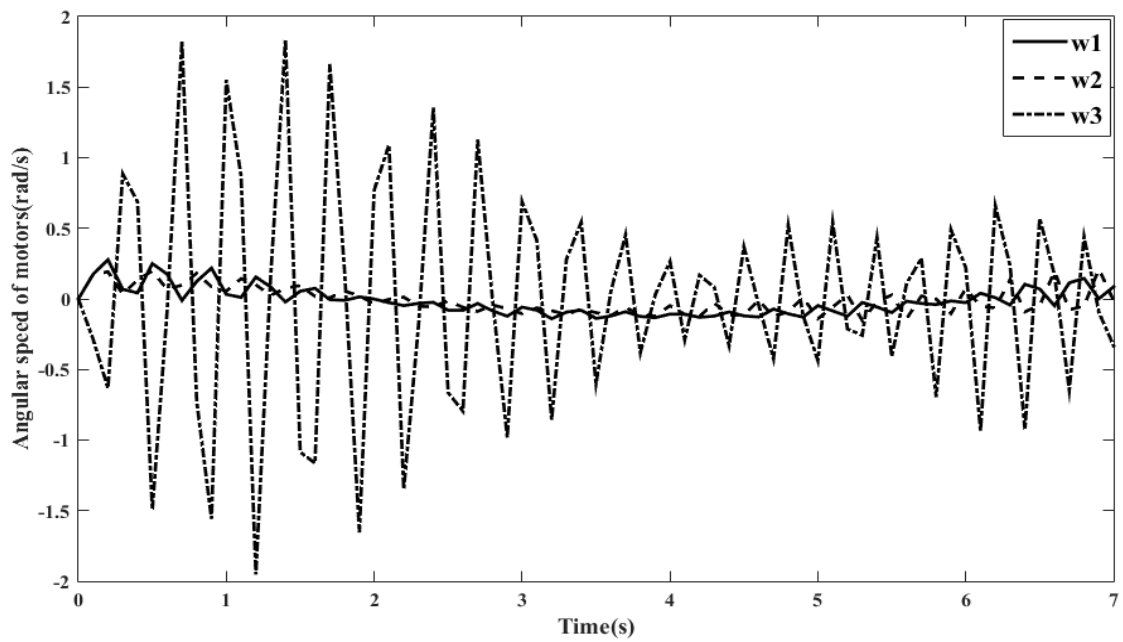
برای سیستم با پارامترهای جدول ۳-۴ و مسیر حرکت شکل ۳-۳۷، نتایج به صورت زیر حاصل می‌گردد



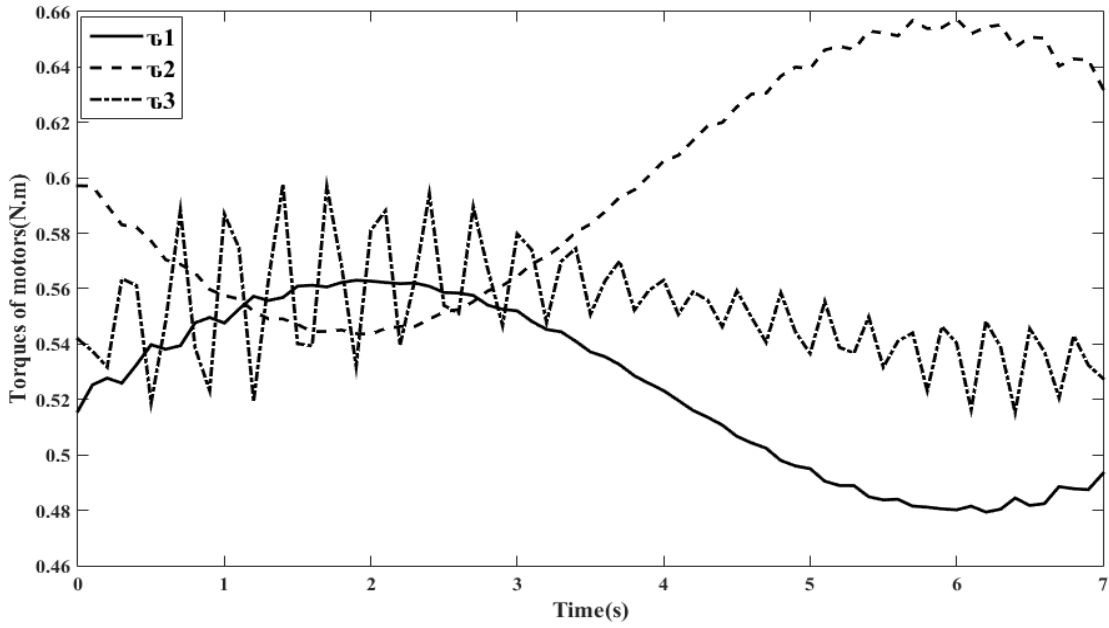
شکل ۳-۳۹ مقادیر کشش کابل‌ها



شکل ۳-۴۰ مقادیر زوایای صفحه متحرک



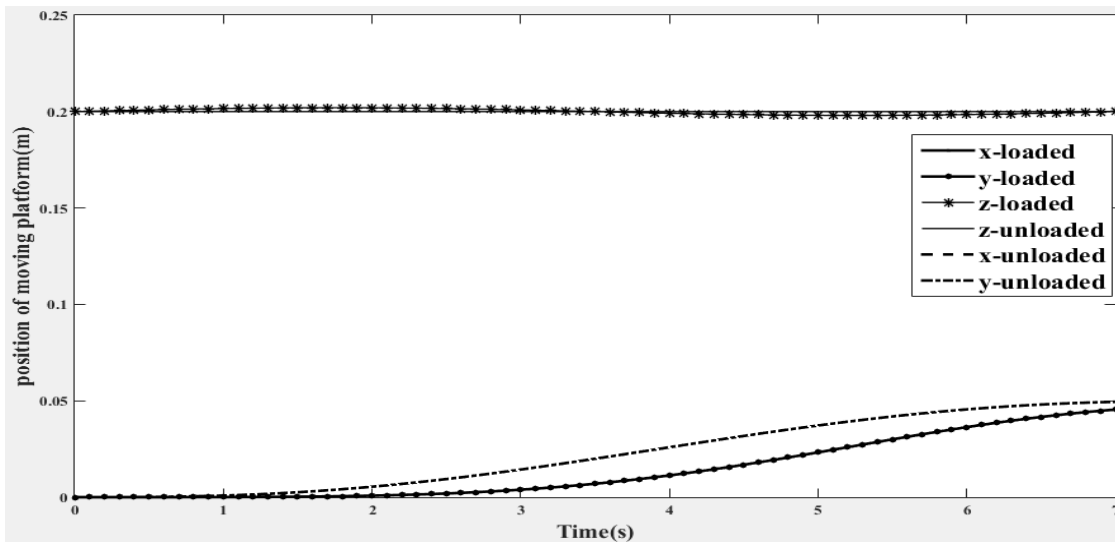
شکل ۳-۴۱ مقادیر سرعت زاویه‌ای موتورهای کشنده کابل‌ها



شکل ۳-۴۲ مقادیر گشتاور تولیدی موتورهای کشنده کابل‌ها

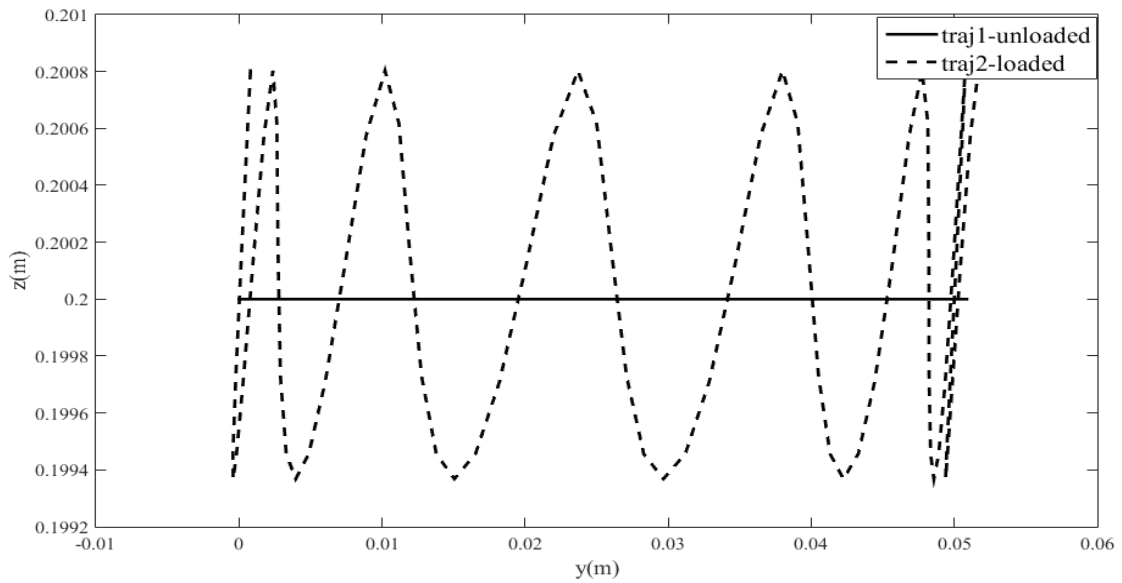
### ۳-۶ نتایج شبیه سازی

اگر بخواهیم مقایسه ای بر روی مسیرهای ذکر شده در بخش ۳-۵ داشته باشیم، نتایج برای مسیر اول بر حسب زمان به شکل ۳-۴۳ حاصل خواهد شد.



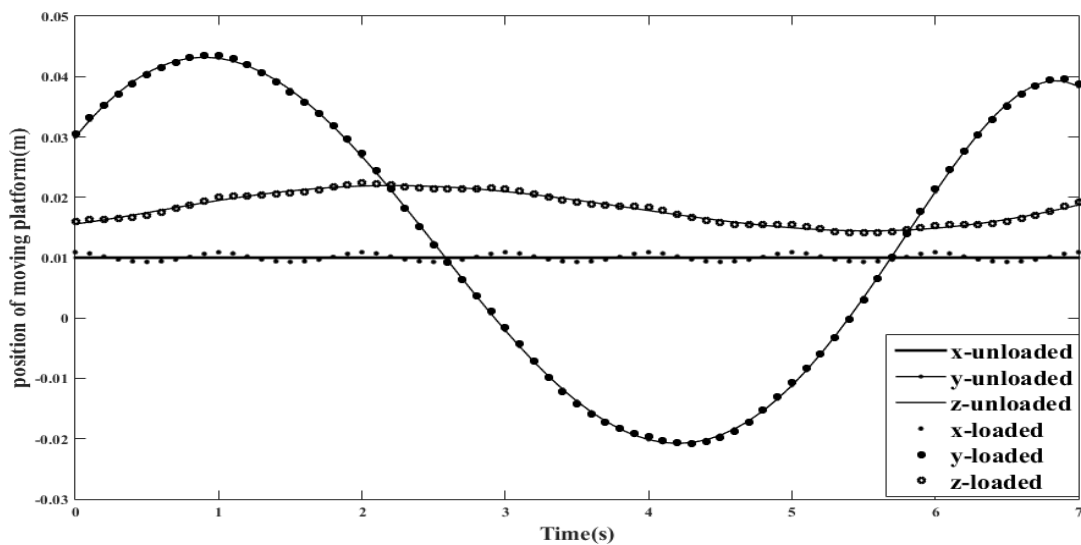
شکل ۳-۴۳ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان

همانطور که دیده می شود راستای  $x$  و  $y$  که بر هم منطبق هستند کمی بالاتر از حالت بدون اعمال بار قرار گرفته اند که این تفاوت به دلیل اعمال نیرو، قابل قبول می باشد و راستای  $z$  نیز با انحراف بسیار کم از حالت بدون اعمال نیرو قرار دارد. این انحراف از مسیر در صفحه  $Z$ - $Y$  در شکل ۳-۴۴ نشان داده شده است



شکل ۳-۴۴ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه  $Z$ - $Y$

نتایج مقایسه برای مسیر دوم بر حسب زمان به شکل ۳-۴۵ حاصل خواهد شد.

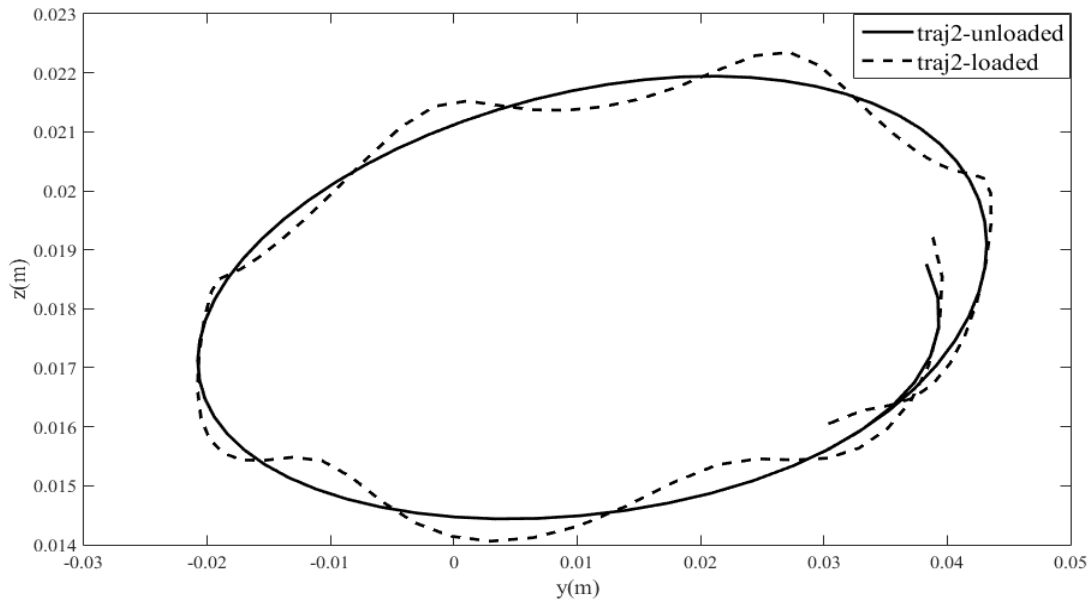


شکل ۳-۴۵ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان



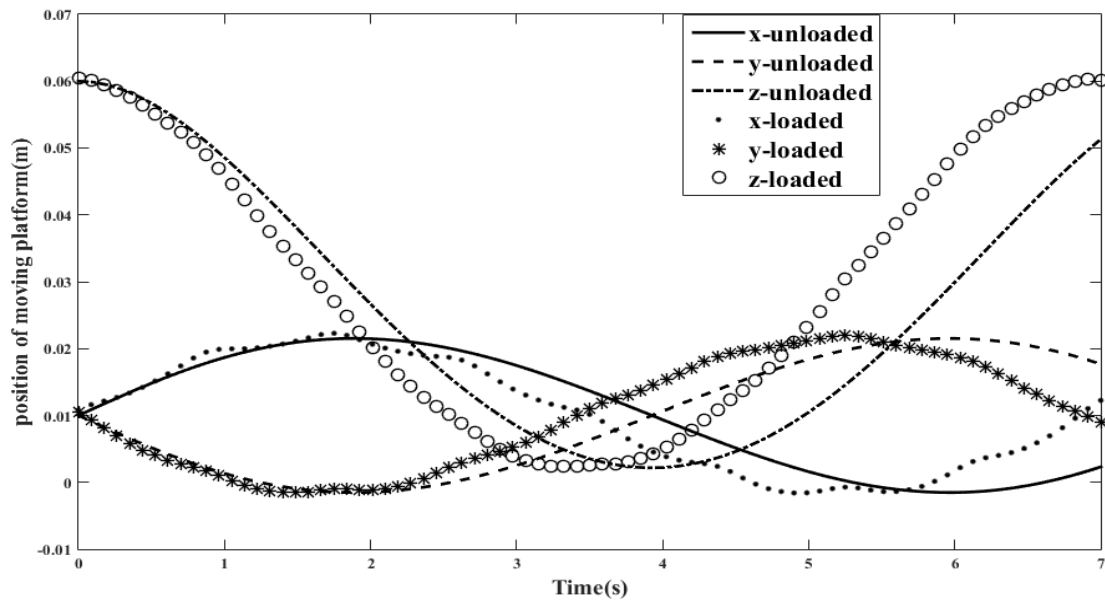
در این مسیر نیز همانگونه که مشخص است انحراف از مسیر در حالت اعمال نیرو بسیار کم می باشد.

این انحراف از مسیر در صفحه Z-Y در شکل ۳-۴۶ نشان داده شده است.



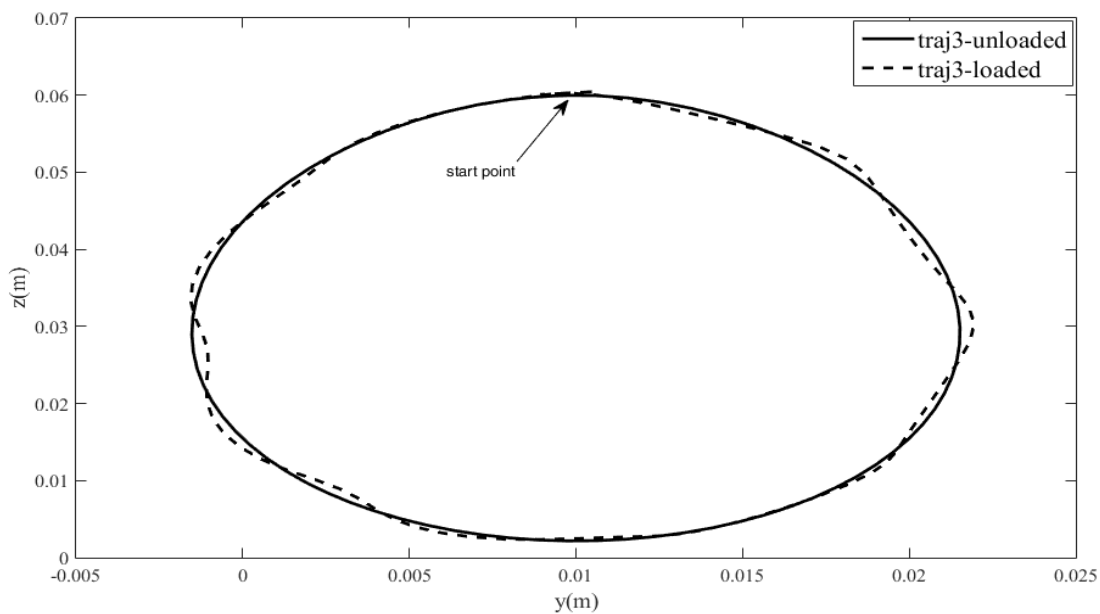
شکل ۳-۴۶ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-Y

نتایج مقایسه برای مسیر سوم بر حسب زمان به شکل ۳-۴۷ حاصل خواهد شد



شکل ۳-۴۷ موقعیت مرکز صفحه متحرک بر حسب زمان

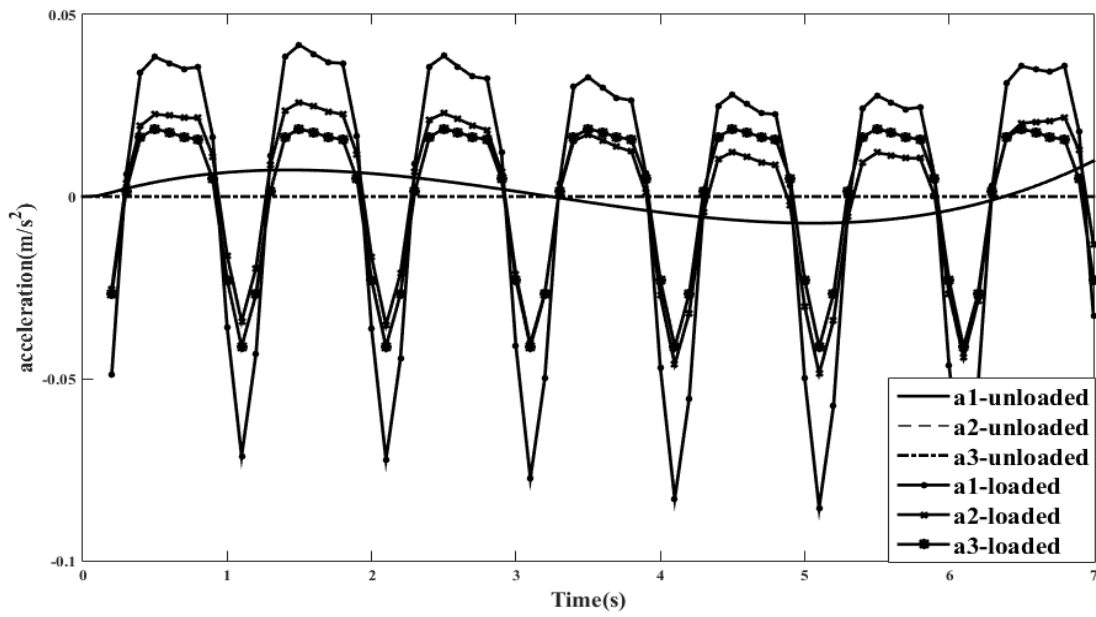
انحراف از مسیر در صفحه Z-Y در شکل ۳-۴۸ نشان داده شده است.



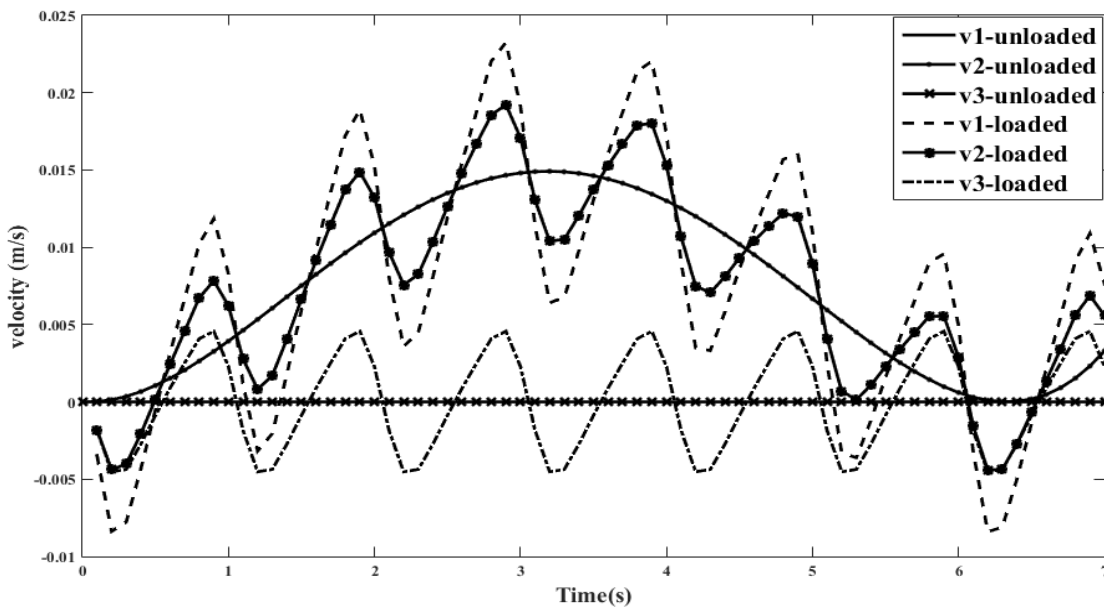
شکل ۳-۴۸ موقعیت مرکز صفحه متحرک در صفحه Z-y

همچنین مقایسه ای که بر روی سرعت ها و شتاب های مسیر و سرعت های زاویه ای محرکه در دو حالت بدون اعمال نیرو و با اعمال نیرو، انجام شد به شکل زیر بدست آمده است.

مسیر اول:

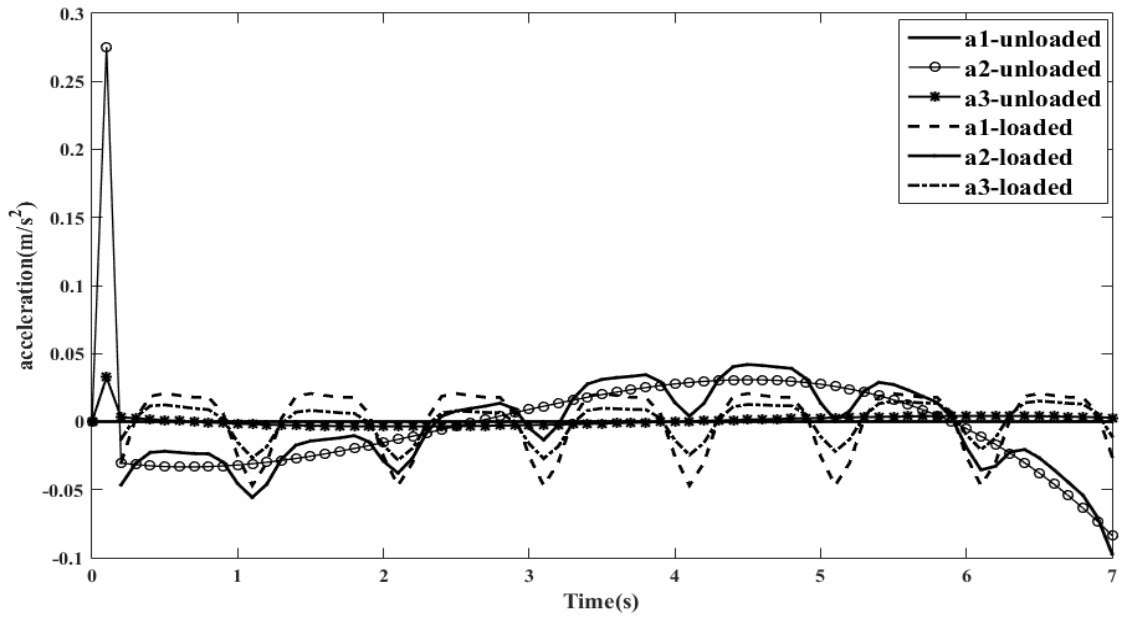


شکل ۳-۴۹ شتاب مرکز صفحه متحرک

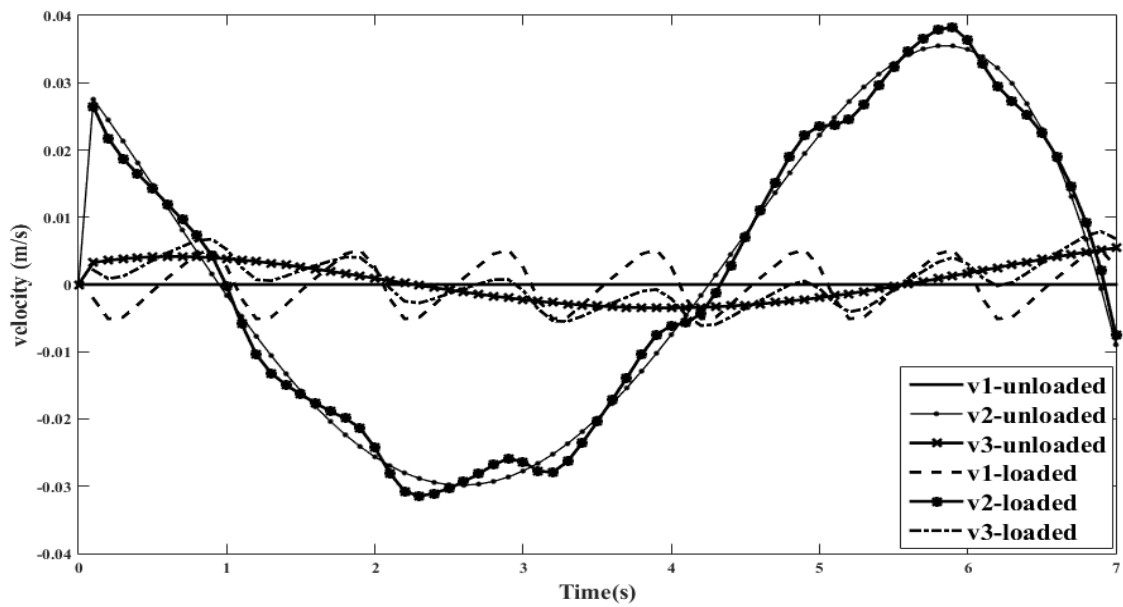


شکل ۳-۵۰ سرعت مرکز صفحه متحرک

مسیر دوم:

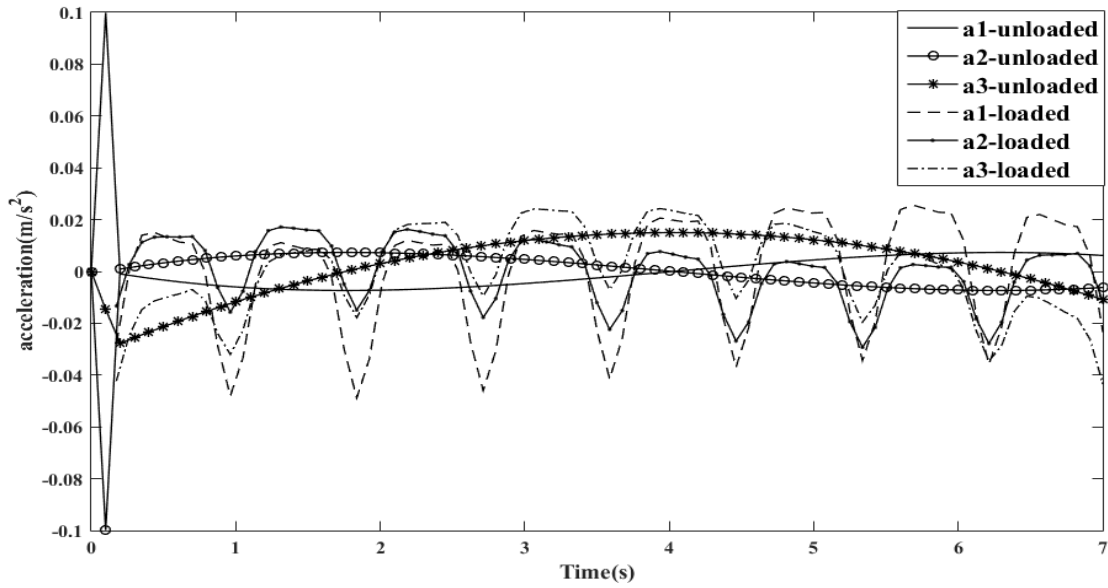


شکل ۳-۵۱ شتاب مرکز صفحه متحرک

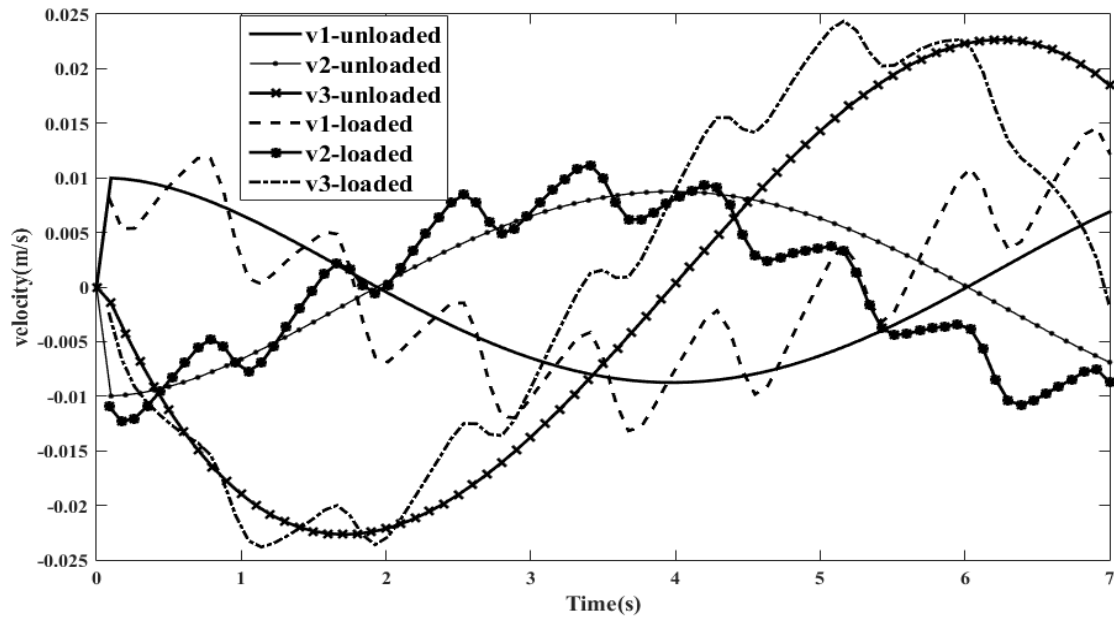


شکل ۳-۵۲ سرعت مرکز صفحه متحرک

مسیر سوم:



شکل ۳-۵۳ شتاب مرکز صفحه متحرک



شکل ۳-۵۴ سرعت مرکز صفحه متحرک

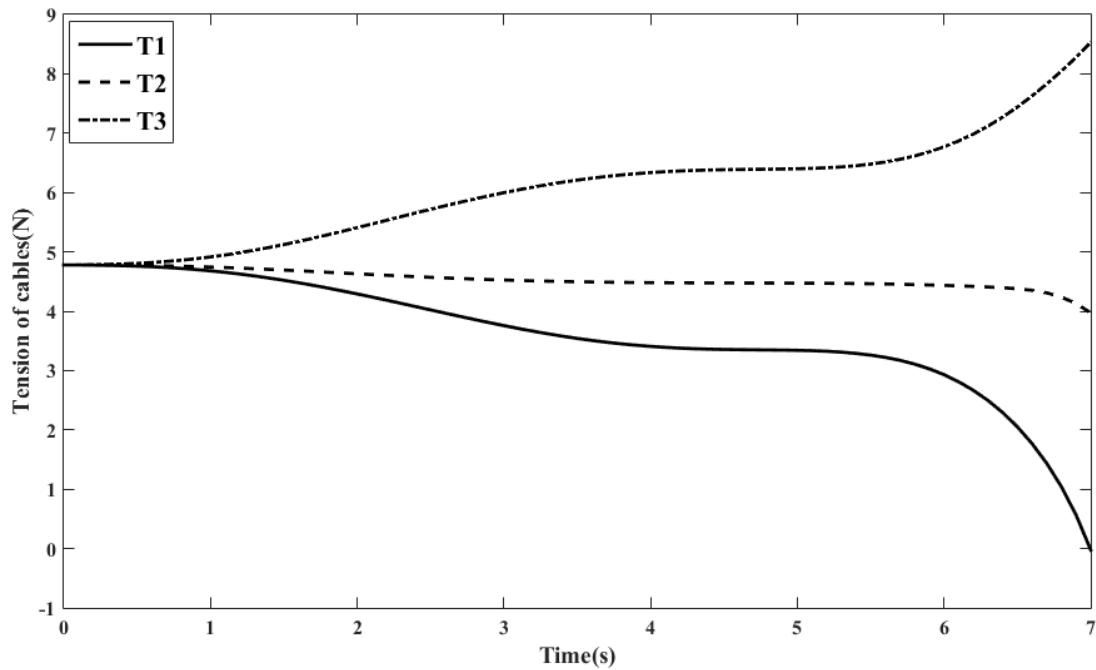
همانطور که از اشکال پیداست در حالت بدون اعمال نیرو، هر سه مسیر در حالت ایده آل خود بدون هیچ نویزی در سیستم قرار دارند (شکل ۳-۷ و ۳-۱۳ و ۳-۱۹). برای سرعت و شتاب، به راحتی می توان نمودارها را بر اساس جابجایی توصیف کرد. به عنوان نمونه در حالت ۱ (مسیر شکل ۳-۷) در

زمانی که جابجایی در حال افزایش بوده سرعت بیشتر شده و زمانی که جابجایی به حالت ثابت رسیده سرعت، ابتدا کاهش و سپس دوباره افزایش یافته؛ در صورت ادامه زمان انتظار داریم این روند در نهایت به یک حالت ثابت ختم شود. در مورد شتاب، زمانی که سرعت روند افزایشی با تقعر رو به بالا دارد شتاب مثبت بوده و برعکس.

با اضافه شدن نیروی مقاوم، در تمام حالات، جابجایی دارای نویز و به هم ریختگی می باشد که سیستم به خوبی توانسته بر اغتشاش به وجود آمده غلبه کند اما نوسانات جابجایی حول مسیر ایده آل کاملاً مشخص است که این نویز در مورد سرعت و شتاب بیشتر نمود پیدا میکند چرا که به دلیل مشتق گرفتن از مکان برای رسیدن به سرعت و مشتق گرفتن از سرعت برای رسیدن به شتاب تغییرات، پر رنگ تر نشان داده می شوند. البته در صورت کوچک تر کردن گام زمانی که در این پایان نامه برابر با ۰,۱ در نظر گرفته شده و پیش فرض سیمولینک نرم افزار متلب بوده، نمودارها از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود اما به دلیل بالا رفتن بسیار زیاد زمان اجرا و حجم محاسبات و تغییر کردن فرم کلی نمودارها، شبیه سازی با همین گام زمانی ۰,۱ مناسب در نظر گرفته شده است.

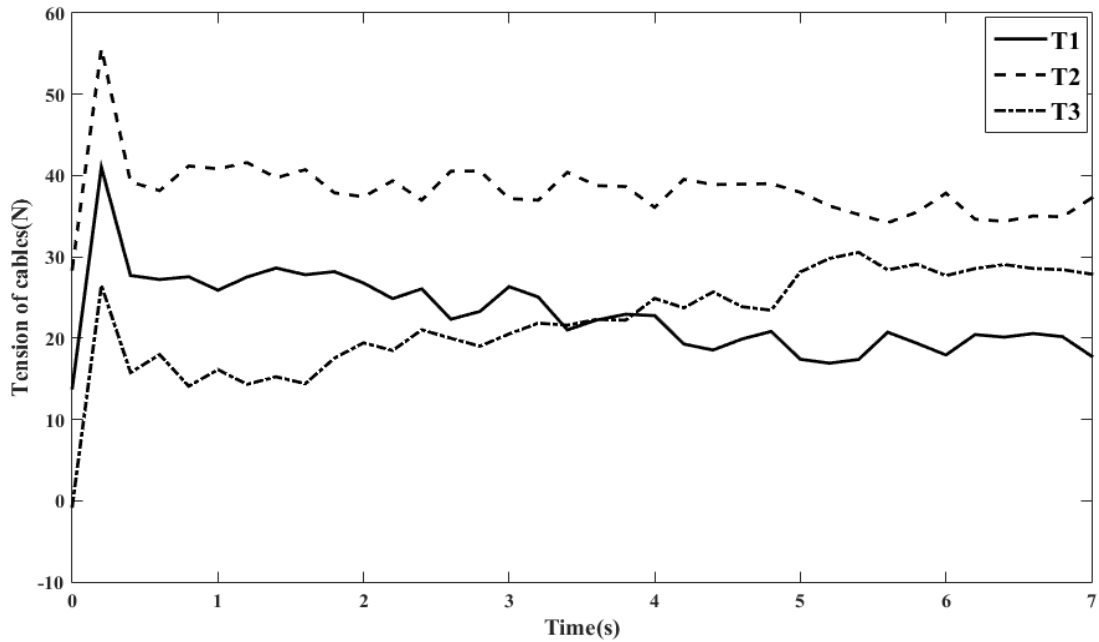
### ۷-۳ پایداری

در این بخش با تغییر مقدار  $d$  به عنوان طول ضلع صفحه متحرک در ربات کابلی، مقادیر کشش کابل را بررسی خواهیم کرد و تا زمانی که مقدار کشش، به صفر یا منفی برسد یعنی جاییکه سیستم ناپایدار می شود این افزایش طول ضلع ادامه خواهد داشت. برای مسیر اول در حالت بدون اعمال نیرو خواهیم داشت.



شکل ۳-۵۵ مقادیر کشش کابل ها

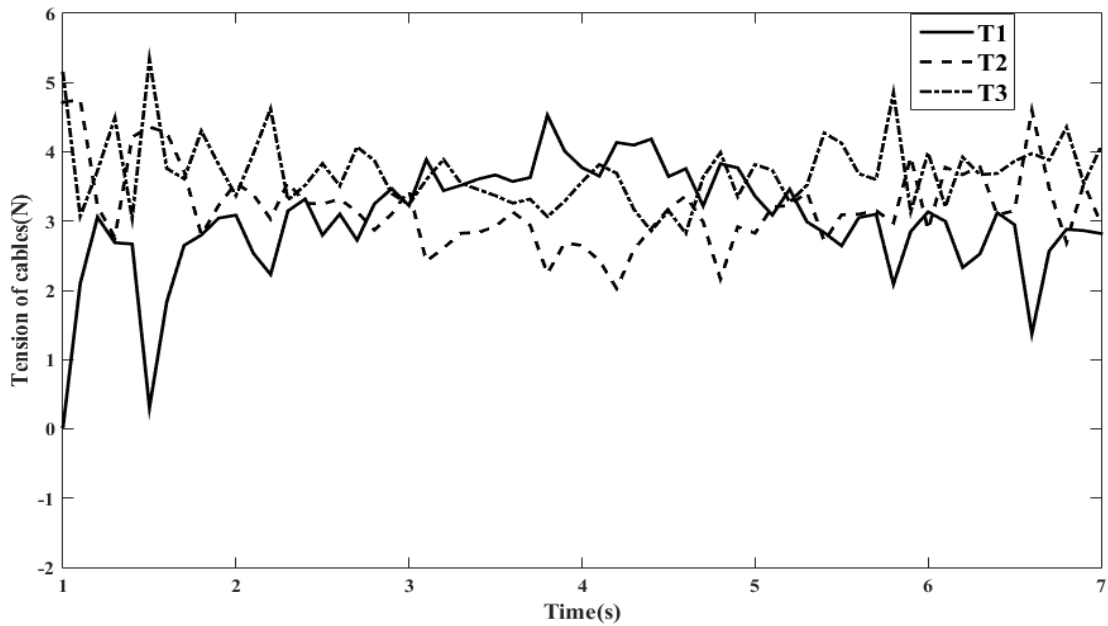
و در حالت اعمال نیرو



شکل ۳-۵۶ مقادیر کشش کابل ها

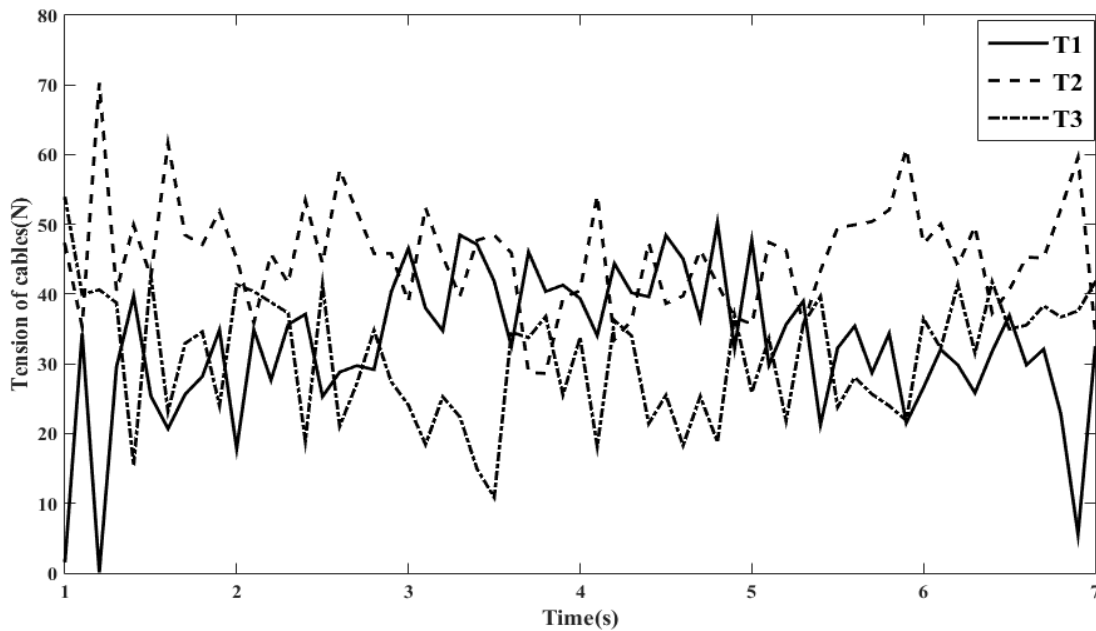
همانطور که در شکل ۳-۵۵ مشخص است در حالتی که مسیر، ساده است و نیرو وجود ندارد تغییر رفتار کشش کابل کاملاً خطی بوده و هیچ بی قاعدگی یا رفتار نامناسب در آن مشاهده نمی شود که

با توجه به آنکه اندازه صفحه  $d=0/13$  فرض شده بنابراین کاملاً معقول و منطقی است. در حالتی که اولاً ابعاد صفحه نسبت به حالت قبل کاهش یافته چراکه در صورت حفظ آن عدد، کشش کابل منفی شده و سیستم ناپایدار خواهد بود. علاوه بر اینکه ابعاد کاهش پیدا کرده و مقدار  $d=0/10$  فرض شده است نوساناتی در کشش کابل مشاهده می شود که طبعاً به دلیل اعمال نیرو از قطعه به ابزار می باشد. برای مسیر دوم در حالت بدون اعمال نیرو خواهیم داشت



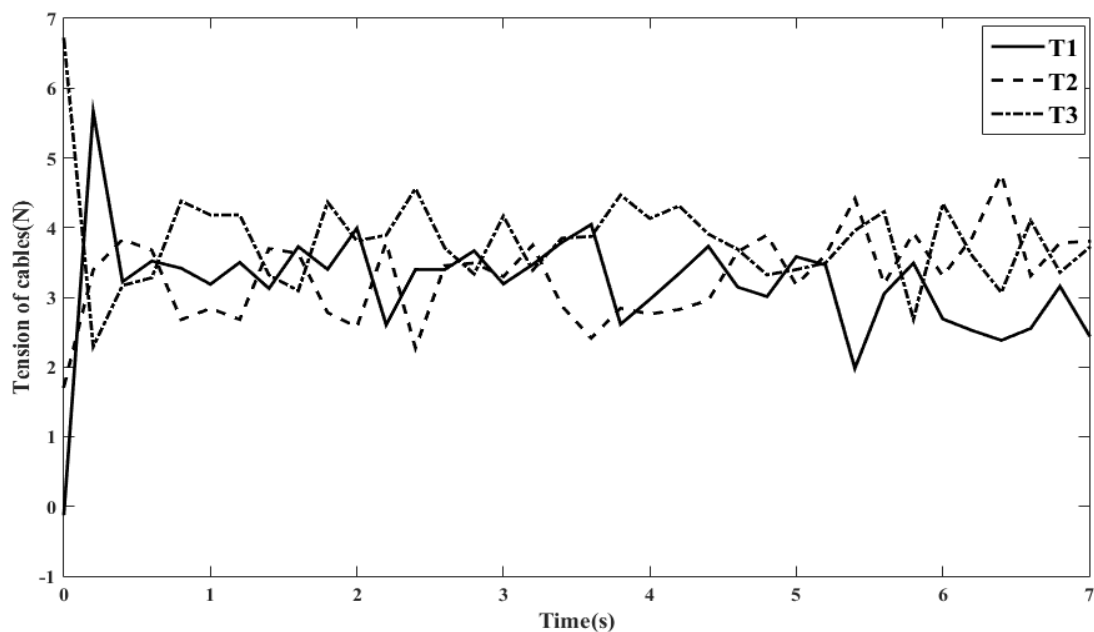
شکل ۳-۵۷ مقادیر کشش کابل ها





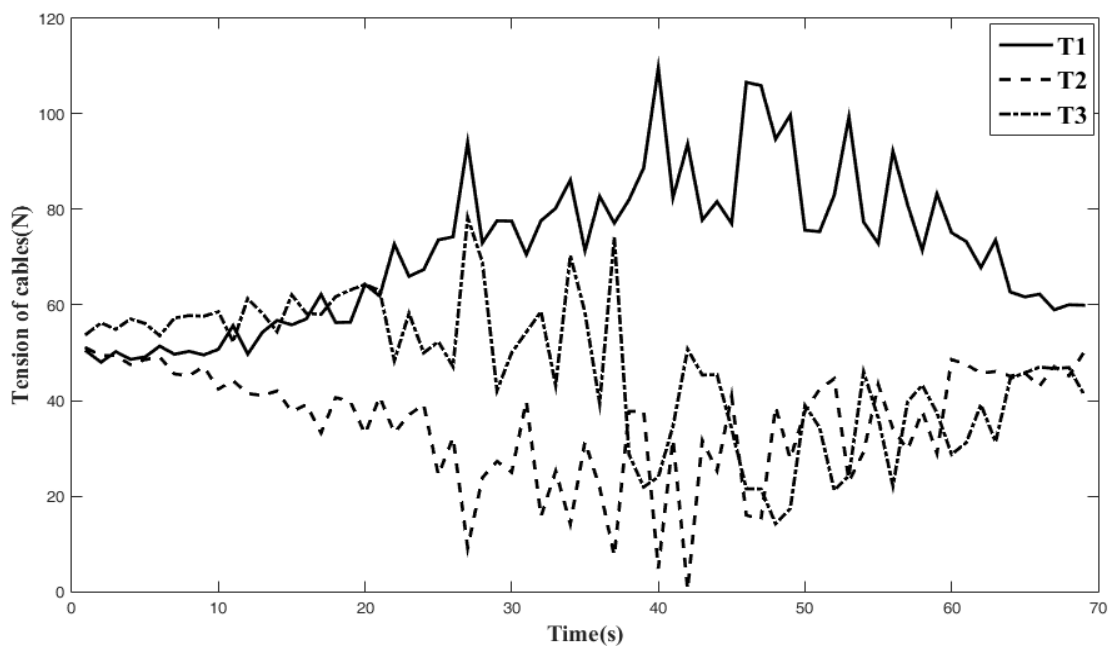
شکل ۳-۵۸ مقادیر کشش کابل ها

هنگامی که بدون در نظر گرفتن نیروی اعمالی از قطعه به ابزار، مدلسازی را انجام می دهیم نوساناتی در کشش کابل به چشم می خورد اما این نوسانات صرفاً به دلیل اصلاحات مسیر بوده و در نهایت، حالت غیر خطی مسیر را مدل خواهد کرد. در این حالت مقدار  $d=0/38$  در نظر گرفته شده است. هنگامی که نیروها در مسیر دوم اعمال می شوند باز هم مقدار عددی  $d$  برای جلوگیری از منفی شدن کشش کابل، تا مقدار  $d=0/30$  کاهش می یابد و علاوه بر آن، نوسانات و مقدار نیرو به طرز کاملاً مشخصی نسبت به حالت بدون بار افزایش خواهد یافت. اگر بخواهیم این مسیر را با مسیر اول به طور همزمان در نظر بگیریم رفتار غیر خطی مسیر دوم به دلیل غیر خطی بودن مسیر می باشد. برای مسیر سوم در حالت بدون اعمال نیرو خواهیم داشت.



شکل ۳-۵۹ مقادیر کشش کابل ها

و در حالت اعمال نیرو



شکل ۳-۶۰ مقادیر کشش کابل ها

در مورد حالت بدون بار باز هم نوسانات، کاملاً مشخص است اما نسبت به مسیر دوم این نوسانات تفاوت دارد که این تفاوت به دلیل دو مسیر در نظر گرفته شده در حالت مسیر دوم و سوم می باشد.

علاوه بر آن در مسیر سوم به دلیل غیر خطی بودن بیشتر مسیر نسبت به مسیر دوم مقدار  $d$  در حالت بدون بار برای حفظ پایداری نسبت به مسیر دوم عدد کمتری به خود اختصاص می دهد ( $d=0/36$ ). در حالتی که نیرو اعمال می شود نوسانات تشدید شده و مقادیر نسبت به دو مسیر قبل تغییرات بیشتری از خود نشان می دهد که این به دلیل فرم غیر خطی مسیر، کاملاً طبیعی است. علاوه بر آن  $d$  مناسب در این حالت نسبت به مسیر دوم کمتر می باشد به این دلیل که وضعیت غیر خطی مسیر، منجر به ناپایداری بیشتری به ازای  $d$  برابر خواهد شد بنابراین مسیر دوم در حالت اعمال بار تا  $d=0/30$  وضعیت خود را حفظ کرده در حالتی که بهترین  $d$  به دست آمده برای مسیر سوم تا  $d=0/18$  می باشد.



## فصل چهارم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۴-۱ نتیجه‌گیری

با پیشرفت فناوری و گسترش روزافزون سیستم‌های رباتیکی، نیاز به مکانیزم‌هایی که در حین سادگی ساختار مکانیکی، هزینه کم ساخت، اشغال فضای کمتر و مصرف کم انرژی بتوانند در کاربردهای متنوع با فضاهای کاری متفاوت مورد استفاده قرار گیرند، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در پاسخ به این نیاز، از اوایل دهه هشتاد میلادی، ربات‌های کابلی شکل گرفتند. در این ربات‌ها، به‌جای استفاده از لینک‌های صلب از کابل استفاده شد که این امر باعث افزایش فضای کاری در این ربات‌ها، کاهش هزینه ساخت و سادگی مکانیزم‌ها گردید. در عوض محدودیت‌هایی نیز برای استفاده از این ربات‌ها وجود دارد که از آن جمله، می‌توان به پایداری کم اشاره کرد. علت پایداری کم در این ربات‌ها، محدودیت اعمال نیرو از طرف کابل‌ها می‌باشد. چون کابل‌ها نمی‌توانند نیروی فشاری اعمال کنند و نیروی اعمالی از طرف آن‌ها تنها در امتداد کابل می‌باشد. با وجود محدودیت ذکر شده برای ربات‌های موازی کابلی، استفاده از این ربات‌ها در صنایع در حال گسترش بوده و متناسب با این گسترش استفاده، تحقیقات انجام شده بر روی مدل‌ها و معرفی انواع مکانیزم‌های جدید در حال افزایش است. یکی از انواع ربات‌های کابلی موازی که تحقیقات کمی درباره آن صورت گرفته است ربات‌های موازی زیر مقید می‌باشند. از جمله محدودیت‌های این نوع ربات، عدم امکان کنترل موقعیت و زاویه قسمت انتهایی به‌طور همزمان می‌باشند. برای رفع محدودیت ذکر شده، در فصل سوم یک مدل مرکب فضایی معرفی شد که در آن از ترکیب ربات موازی کابلی با سه کابل و یک اپراتور انسانی استفاده گردید.

در ربات‌های زیر مقید، برای تعیین پیکربندی ربات، علاوه بر هندسه سیستم باید دینامیک و استاتیک سیستم نیز بررسی شوند که این موضوع، خود باعث افزایش پیچیدگی‌های تحلیل بر روی این نوع از ربات‌های کابلی می‌گردد. در فصل دوم، با استفاده از هندسه سیستم‌های معرفی شده و با توجه به استاتیک، مسئله سینماتیک-استاتیک وارون برای مدل مطرح شده حل گردید. همچنین با استفاده از معادلات نیوتن-اویلر، فرم معادلات دینامیکی برای ربات کابلی صفحه‌ای به دست آمد. در ربات‌های زیر مقید با وارد شدن بار خارجی بر قسمت انتهایی، پیکربندی ربات تغییر می‌کند، بدین منظور برای

تحلیل حرکت ربات و کنترل آن باید بتوان بارهای خارجی اعمالی را مدل کرد که بدین منظور باید از نوع، مقدار و جهت بارهای اعمالی اطلاع داشت. در فصل سوم برای مدل مرکب مطرح شده، گشتاور و نیروی اعمالی از طرف ابزار پولیشکاری محاسبه گردید و اثر آن‌ها بر روی قسمت موازی به عنوان بار خارجی در نظر گرفته شد و با استفاده از سه موتور، اثر دو قسمت بر روی یکدیگر خنثی گردید.

#### ۲-۴ ارائه پیشنهادها

با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان پیشنهادهای مورد نظر را در چند محور اصلی زیر بیان کرد:

- در نظر گرفتن انعطاف و جرم کابل‌ها

در اکثر تحقیقات صورت گرفته در مورد ربات‌های کابلی، کابل‌ها به صورت اجسام صلب در نظر گرفته شده‌اند، در صورتی که در واقعیت به علت طول زیاد کابل‌ها، کرنش در این کابل‌ها دارای مقادیر قابل توجهی می‌باشد. این موضوع زمانی که سرعت حرکت ربات کابلی بالا می‌باشد بیشتر نمود پیدا کرده به طوری که عدم توجه به آن و صرف نظر کردن از تأثیرات انعطاف کابل در معادلات می‌تواند در پایداری سیستم و نوسانات آن تأثیر گذار باشد. همچنین در اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی ربات‌های کابلی از جرم کابل‌ها صرف نظر شده است و کابل به صورت مستقیم در نظر گرفته می‌شود. این فرض برای مدل‌های بزرگ که در آن نیاز به استفاده از کابل‌های قطور و با وزن بالا می‌باشد می‌تواند خطاهای قابل توجهی را در نتایج تجربی به وجود آورد.

- تست نتایج تئوری بر روی سیستم عملی

در این گام، نمونه تجربی از ربات کابلی فضایی طراحی شده و پس از ساخت سخت‌افزار لازم، الگوریتم پیشنهادی بر روی مدل ساخته شده پیاده‌سازی و نتایج تئوری با نتایج عملی مقایسه می‌گردد.

- بررسی خطای انسانی

یکی از محدودیت‌های مدل پیشنهادی و کلا شبیه‌سازیهای صورت گرفته در این حوزه وجود دارد

عدم قطعیت در عملکرد انسان در مدل می باشد. این موضوع که ربات تا چه حد میتواند خطای انسانی را تحمل و یا آن را به عنوان ورودی صحیح بپذیرد بسیار حائز اهمیت می باشد.



- [1] Pusey, Jason, Abbas Fattah, Sunil Agrawal, and Elena Messina. "Design and workspace analysis of a 6-6 cable-suspended parallel robot." *Mechanism and machine theory* 39, no. 7 (2004): 761-778.
- [2] Tang, Xiaoqiang. "An overview of the development for cable-driven parallel manipulator." *Advances in Mechanical Engineering* (2014).
- [3] S. A. Khalilpour, H. Taghirad, M. Tale Masouleh, M. A. Shoorehdeli, "Multi-Objective Optimization of 6-Degree-of-Freedom Cable-Driven Parallel Robot Using Kinematic Indices", *Control Journal*, No. 2, (2013), pp. 43-55.
- [4] s. esfehani, "Design, Simulink and Control a Cable Driven Parallel Robot", KNTU Thesis, (2012).
- [5] Carricato, Marco, and J-P. Merlet. "Geometrico-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robots." In *Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine*, pp. 309-319. Springer Netherlands, (2010).
- [6] M. Carricato and J. P. Merlet, "Geometric-static analysis of under-constrained cable-driven parallel robots a general theory", *IEEE Transactions on robotics*, submitted, 2011.
- [7] A. Haddadi, "analysis and control of a elastic cable robot in Planar moving", esfehah university, (2011).
- [8] Bosscher, Paul Michael. "Disturbance robustness measures and wrench-feasible workspace generation techniques for cable-driven robots." PhD diss., Georgia Institute of Technology, (2004).
- [9] Ulrich, B. J., A. K. Srivastava, and M. A. Elbestawi. "Analysis of the robotic disc grinding process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 7, no. 2 (1992): 82-92.
- [10] Dai, H., K. M. Yuen, and M. A. Elbestawi. "Parametric modelling and control of the robotic grinding process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 8, no. 3 (1993): 182-192.
- [11] Badger, J. A., and A. A. Torrance. "A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40, no. 8 (2000): 1099-1120.
- [12] Challen, J. M., and P. L. B. Oxley. "An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models." *Wear* 53, no. 2 (1979): 229-243.
- [13] Williams, J. A., and Y. Xie. "The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves." *Wear* 155, no. 2 (1992): 363-379.
- [14] Agarwal, Sanjay, and P. Venkateswara Rao. "Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 65 (2013): 68-78.
- [15] Liu, Qiang, Xun Chen, Yan Wang, and Nabil Gindy. "Empirical modelling of grinding force based on multivariate analysis." *Journal of Materials Processing Technology* 203, no. 1 (2008): 420-430.
- [16] Tang, Jinyuan, Jin Du, and Yongping Chen. "Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding." *Journal of materials processing technology* 209, no. 6 (2009): 2847-2854.

- [17] Zhang, N., I. Kirpitchenko, and D. K. Liu. "Dynamic model of the grinding process." *Journal of sound and vibration* 280, no. 1 (2005): 425-432.
- [18] Tahvilian, Amir Masoud, Bruce Hazel, Farzad Rafieian, Zhaoheng Liu, and Henri Champlaud. "Force model for impact cutting grinding with a flexible robotic tool holder." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85, no. 1-4 (2016): 133-147.
- [19] Korayem, M. H., and M. Bamdad. "Dynamic load-carrying capacity of cable-suspended parallel manipulators." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 44, no. 7 (2009): 829-840.
- [20] Nahavandi, Saeid, Mohammad Jashim Uddin, Mozafar Saadat, and Hieu Trinh. "Heavy tools manipulation by low powered direct-drive five-bar parallel robot." *Mechanism and machine theory* 43, no. 11 (2008): 1450-1461.
- [21] Albus, James, Roger Bostelman, and Nicholas Dagalakis. "The NIST robocrane." *Journal of National Institute of Standards and Technology* 97, no. 3 (1992).
- [22] Ming, Aiguo, and Toshiro Higuchi. "Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires. I: Concept, design and control." *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 28, no. 2 (1994): 131-138.
- [23] Williams, Robert L., and Paolo Gallina. "Planar cable-direct-driven robots: design for wrench exertion." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 35, no. 2 (2002): 203-219.
- [24] Khosravi, Mohammad A., and Hamid D. Taghirad. "Dynamic analysis and control of cable driven robots with elastic cables." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 35, no. 4 (2011): 543-558.
- [25] Behzadipour, Saeed, and Amir Khajepour. "Design of reduced dof parallel cable-based robots." *Mechanism and Machine Theory* 39, no. 10 (2004): 1051-1065.
- [26] Li, Xuekun. "Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis." PhD diss., WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, (2010).
- [27] Bamdad, Mahdi, Farzin Taheri, and Niloofar Abtahi. "Dynamic analysis of a hybrid cable-suspended planar manipulator." In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 1621-1626. IEEE, (2015).
- [28] Taheri, Farzin. "Optimal trajectory planning of a modified crane considering external load uncertainly" Shahroud University, (2014).
- [29] Fattah, Abbas, and Sunil K. Agrawal. "On the design of cable-suspended planar parallel robots." *Journal of mechanical design* 127, no. 5 (2005): 1021-1028.
- [30] Korayem, Moharam Habibnejad, M. Bamdad, H. Tourajizadeh, A. Habibnejad Korayem, and S. Bayat. "Analytical design of optimal trajectory with dynamic load-carrying capacity for cable-suspended manipulator." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60, no. 1 (2012): 317-327.
- [31] Korayem, M. H., M. Bamdad, R. M. Zehtab, and M. Iranpour. "First Experimental Results of Load Carrying Capacity for a Planar Cablesuspended Manipulator." *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* 3, no. 4 (2010): 11-16.

- [32] Guo, Miaoxian, Beizhi Li, Zishan Ding, and Steven Y. Liang. "Empirical modeling of dynamic grinding force based on process analysis." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86, no. 9-12 (2016): 3395-3405.
- [33] Yanai, Noritaka, Motoji Yamamoto, and Akira Mohri. "Inverse dynamics analysis and trajectory generation of incompletely restrained wire-suspended mechanisms." In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 3489-3494. IEEE, (2001).
- [34] Meriam, James L., and L. Glenn Kraige. *Engineering mechanics: dynamics*. Vol. 2. John Wiley & Sons, (2012).
- [35] Wojtara, Tytus, Masafumi Uchihara, Hideyuki Murayama, Shingo Shimoda, Satoshi Sakai, Hideo Fujimoto, and Hidenori Kimura. "Human–robot collaboration in precise positioning of a three-dimensional object." *Automatica* 45, no. 2 (2009): 333-342.
- [36] Pi, Yangjun, and Xuanyin Wang. "Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances." *Control Engineering Practice* 19, no. 2 (2011): 185-193.



## پیوست

## پیوست ۱

عناصر ماتریس های رابطه ۲-۱۶ به صورت زیر می باشند

$$m_{11} = m_1 + m_2 + m_p$$

$$m_{12} = m_{21} = 0$$

$$m_{13} = m_{31} = -(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) - m_2 L_1 \cos(q_1 + \theta_z)$$

$$m_{14} = m_{41} = -(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z)$$

$$m_{15} = m_{51} = 0$$

$$m_{22} = m_1 + m_2 + m_p$$

$$m_{23} = m_{32} = -(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) - m_2 L_1 \sin(q_1 + \theta_z)$$

$$m_{24} = m_{42} = -(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z)$$

$$m_{25} = m_{52} = 0$$

$$m_{33} = m_2 (L_{c2}^2 + L_1^2) + m_p L_2^2 + 2m_2 L_1 L_{c2} \cos q_2 + l_1 + l_2$$

$$m_{34} = m_{43} = m_p L_2^2 + m_2 L_{c2}^2 + m_2 L_1 L_{c2} \cos q_2 + l_2$$

$$m_{35} = m_{53} = l_1 + l_2$$

$$m_{44} = m_p L_2^2 + m_2 L_{c2}^2 + l_2$$

$$m_{45} = m_{54} = l_2$$

$$m_{55} = l_1 + l_2$$

$$c_1 = \left[ (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) + m_2 L_1 \sin(q_1 + \theta_z) \right] \dot{q}_1^2$$

$$+ [(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) - (m_1 L_{c1} + m_p L_1) \cos(q_1 + \theta_z)]$$

$$+ (m_1 L_{c1} \dot{q}_1 + m_p L_1 \dot{q}_1 + m_1 L_{c1} \dot{\theta}_z + m_2 L_1 \dot{\theta}_z + m_p L_1 \dot{\theta}_z) \sin(q_1 + \theta_z) \dot{q}_1$$

$$+ \left[ (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) \right] \dot{q}_2^2$$

$$\begin{aligned}
& +[(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z)] \dot{q}_2 \\
& + 2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) \\
c_2 = & -[(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) + m_2 L_1 \cos(q_1 + \theta_z)] \\
& -[(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) - (m_1 L_{c1} + m_p L_1) \sin(q_1 + \theta_z)] \\
& + (m_1 L_{c1} q_1 + m_p L_1 q_1 + m_1 L_{c1} \theta_z + m_2 L_1 \theta_z + m_p L_1 \theta_z) \cos(q_1 + \theta_z) \dot{q}_1 \\
& - \left[ (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) \right] \dot{q}_2^2 \\
& - [(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z)] \dot{q}_2 \\
& - 2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) \\
c_3 = & [-(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) + (m_1 L_{c1} + m_p L_1) \cos(q_1 + \theta_z)] \\
& - (m_1 L_{c1} q_1 + m_p L_1 q_1 + m_1 L_{c1} \theta_z + m_2 L_1 \theta_z + m_p L_1 \theta_z) \sin(q_1 + \theta_z) \dot{x} \\
& + [-(m_2 L_{c2} \theta_z + m_p L_2 \theta_z) \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) + (m_1 L_{c1} + m_p L_1) \sin(q_1 + \theta_z)] \\
& + m_1 L_{c1} q_1 + m_p L_1 q_1 + m_1 L_{c1} \theta_z + m_2 L_1 \theta_z + m_p L_1 \theta_z) \sin(q_1 + \theta_z) \dot{y} \\
& - [(m_2 L_1 L_2) \cos q_2 + (m_p L_1 L_2 q_1 + 2 m_2 L_1 L_{c2} \theta_z + m_p L_1 L_2 \theta_z) \sin q_2] \dot{q}_2 \\
& - (m_2 L_1 L_{c2} \sin q_2) \dot{q}_2^2 - 2(m_2 L_1 L_{c2} \sin q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2
\end{aligned}$$

$$c_4 = \sin q_2 (m_2 L_1 L_{c2}) \dot{q}_1^2 - \left[ (m_p L_2 + m_p L_{c2}) \theta_z \sin(q_1 + q_2 + \theta_z) \right] \dot{x}$$

$$+ \left[ (m_p L_2 + m_p L_{c2}) \theta_z \cos(q_1 + q_2 + \theta_z) \right] \dot{y}$$

$$+ \left[ (m_p L_1 L_2) \cos q_2 + (m_p L_1 L_2 q_1 + 2m_2 L_1 L_{c2} \theta_z + m_2 L_1 L_{c2} \theta_z) \sin q_2 \right] \dot{q}_1$$

$$G_1 = G_2 = 0$$

$$G_3 = -(m_p L_1^2 + m_p L_2 \cos q_2 + m_1 L_{c1}^2) \theta_z - (m_1 L_{c1}^2 + m_p L_1^2) q_1$$

$$-(m_2 L_1 + m_1 L_{c1} + m_p L_1) g \sin(q_1 + \theta_z)$$

$$-(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) g \sin(q_1 + q_2 + \theta_z)$$

$$G_4 = (m_2 L_1 L_{c2} + m_p L_1 L_2) \theta_z^2 \sin q_2 - (m_p L_2 + m_2 L_{c2}) g \sin(q_1 + q_2 + \theta_z)$$

$$+ m_p L_1 L_2 \theta_z q_1 \sin q_2$$

$$G_5 = - \left[ m_p (L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 \cos q_2) + m_1 L_{c1}^2 + m_2 (L_1^2 + L_{c2}^2 + 2L_1 L_2 \cos q_2) \right] \theta_z$$

$$-(m_p L_1^2 + m_p L_1 L_2 \cos q_2 + m_1 L_{c1}^2) q_1$$

$$-(m_2 L_1 + m_1 L_{c1} + m_p L_1) g \sin(q_1 + \theta_z)$$

$$-(m_p L_2 + m_2 L_{c2}) g \sin(q_1 + q_2 + \theta_z)$$



## پیوست ۲

ضرایب فوریه مورد استفاده در رابطه ۲-۲۶ از روابط زیر به دست می‌آید [۳۴].

$$C_N = \sqrt{A_N^2 + B_N^2}$$

$$\varphi_N = \tan^{-1} \left( \frac{B_N}{A_N} \right)$$

$$A_2 \cong \frac{1}{4} \cdot \frac{w d}{V_w} \cdot \sqrt{D} \cdot a \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

$$B_2 \cong \frac{1}{8} \cdot \frac{w^2 d^2 D}{V_w^2}$$

$$A_0 = \frac{1}{8} \cdot \frac{w^2 d^2 D}{V_w^2}$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{V_w} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{a}{p_0}} \right)$$

$$A_3 \cong 0$$

$$A_1 \cong d$$

$$B_3 \cong \frac{1}{32} \cdot \frac{a^{\frac{-3}{2}} d^2}{p_0}$$

$$B_1 \cong \frac{w d}{V_w} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{a}{p_0}}$$

$$\varphi_3 \cong 90^\circ$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{w}{V_w} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{a}{p_0}} \right)$$

$$\theta_0 = a \tan \left( \frac{y_0}{x_0} \right)$$

رابطه زیر، معادله عمق برش ثابت را محاسبه می‌کند:

$$a_{pv} = a_p - V_{0y} / \sqrt{(V_w + V_{0x})^2 + (V_{0y})^2} \cdot \sqrt{D \cdot a_p + D/4 \cdot V_{0y}^2} / [(V_w + V_{0x})^2 + (V_{0y})^2]$$

$$\Delta a_p = a_p - a_{p0} = -y_1 = d \sin(\theta + \theta_0) - y_0$$

$$\Delta a_{pv} = a_{pv} - a_{pv}$$

$$V_{0x} = \frac{dx}{dt}_1$$

$$V_{0y} = \frac{dy}{dt}_1$$

با فرض اینکه  $Y_0 = 0$  و  $V_{0x}, V_{0y} \ll V_w$ ، تغییرات دینامیکی عمق برش در حالت لرزش به صورت

معادله زیر، محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \Delta a_{pv} &= \Delta a_p + V_{0y} / \sqrt{(V_w + V_{0x})^2 + (V_{0y})^2} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{a_{p0} - \Delta a_p} + \frac{D}{4} \cdot V_{0y}^2 / [(V_w + V_{0x})^2 + (V_{0y})^2] \\ &= \Delta a_p + wd \cos(wt) / V_w \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{a_{p0} - \Delta a_p} + \frac{D}{4} \cdot w^2 d^2 \cos^2(wt) / V_w^2 \\ &= d \sin(wt) + wd / V_w \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{a_{p0} + d \sin(wt)} \cdot \cos(wt) + \frac{D}{4} \cdot w^2 d^2 \cos^2(wt) / V_w^2 \\ &= d \sin(wt) + \frac{D}{4} \cdot w^2 d^2 \cos^2(wt) / V_w^2 + wd / V_w \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{a_{p0}} \cdot \cos(wt) + wd / V_w \cdot \sqrt{D} \cdot \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot [1 \cdot (-1) \cdot (-3) \cdot \dots \cdot (3 - 2n)] / 2 \cdot a_{p0}^{\frac{n}{2}} \cdot (d \sin(wt))^{\frac{n}{2}} \cdot \cos(wt) \end{aligned}$$

چون مقادیر هارمونیک می توانند با استفاده از تحلیل فوریه به دست آیند، تغییرات دینامیکی عمق

برش طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned}
\Delta a_{pv} &= d \sin(\omega t) + \frac{1}{8} \omega^2 \frac{d^2}{V} \frac{D}{\omega} (\cos(2\omega t) + 1) + \\
&\omega d/V \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{a_{p0}} \cdot \cos(\omega t) + \omega d/V \cdot \sqrt{D} \cdot \left[ \frac{1}{4} a_{p0}^2 d \sin(2\omega t) + \frac{1}{32} a_{p0}^2 d^2 (\cos(3\omega t) - \cos(\omega t)) + \right. \\
&\left. \frac{1}{12} 8 a_{p0}^3 d^2 (2 \sin(2\omega t) - \sin(4\omega t)) + \frac{5}{2048} a_{p0}^4 d^2 (3 \cos(3\omega t) - 2 \cos(\omega t) - \cos(5\omega t)) \right. \\
&\left. + \frac{7}{8192} a_{p0}^5 d^2 (4 \sin(4\omega t) - 5 \cos(2\omega t) - \sin(6\omega t)) \dots \right] \\
&= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_N \sin(n\omega t) + B_N \cos(n\omega t)]
\end{aligned}$$

## **Abstract**

Cable robots as the group's industrial robot used in this study has important industrial capabilities such as: simplicity, light weight, low cost and high payload. In this regard, the interaction between robots and human, the task of bearing the weight of the robot and the operator of the tool be studied. In this thesis, the forces of the tool to cables regardless of the reaction process, calculated by And then force the polishing process of hunting & Moments reaction of tools to the robot cable, the interaction tool and the workpiece and the robot is shown in full. The loading of the proposed algorithm for dynamic interaction between human and tool is intended. In this loading, the workpiece, the tool robot and human disturbance or nuisance into force, the reform path and maintain stability and balance of play. Finally, with regard to the forces applied to the end-robot, was designed motor cable.

**Keywords:** Design, Cable Robot, Polishing Process, Human-Robot Cooperation



**Shahrood University of Technology**

**Kharazmi International Campus**

**M.Sc. Thesis in Mechatronics Engineering**

**Design and Analyse of a Spatial Cable Robot for a  
Fabrication Process in Human-Robot Interaction**

By: Nastaran naghizadeh

Supervisor:

Dr. Mahdi bamdad

February 2017