



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی

## شناسایی و جداسازی خطای محرکه های ربات موازی با روش باندگراف

نگارنده: سجاد ایدی فر

استاد راهنما

دکتر مهدی بامداد

مهر ۱۳۹۹

شماره: ۲۱/۲۹۹/۱۳۹۸  
تاریخ: ۹۹/۱/۱۰

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سجاد ایدی فر با شماره دانشجویی ۹۵۰۲۱۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان شناسایی و جداسازی خطای محرکه‌های ربات موازی با روش باندگراف که در تاریخ ۹۹/۷/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

|   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰                               | <input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸         |
| <input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹                               | <input checked="" type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ |
| <input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد     |  |
| نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی |  |

| عضو هیأت داوران           | نام و نام خانوادگی   | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|----------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول      | دکتر مهدی بامداد     | استادیار   |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم      |                      | —          | —     |
| ۳- استاد مشاور            |                      | —          | —     |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر مصطفی نظری      | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول        | دکتر ناصرالدین سپهری | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم        | دکتر سید وحید حسینی  | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۹، ۱، ۹

## تشکر و قدردانی

از کسانی که در انجام این رساله من را یاری کردن

# تعمیرنامه

اینجانب سجاد ایدی فر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه شناسایی و جداسازی خطای محرکه های ربات موازی با روش بانداگراف تحت راهنمایی دکتر مهدی بامداد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

در این رساله به بررسی شناسایی و جداسازی خطا برای یک ربات موازی کابلی پرداخته شده است. ابتدا الگوریتم های موجود برای شناسایی و جداسازی خطا بررسی شده و جهت ارزیابی عملکرد آنها بر روی یک بازوی رباتیکی پیاده سازی شده است. تنها خطاهای موجود در عملگرهای الکتریکی به عنوان خطاهای موجود در سیستم در نظر گرفته شده است. خطای مقاومت الکتریکی، ضریب میرایی بلبرینگ موتور و ضریب فنریت محور به عنوان منشاء های خطا در نظر گرفته شده است. با معرفی باقیمانده ها برای هر خطا، می توان وجود خطا و همچنین منشاء آن را به صورت دقیق شناسایی نمود. با انجام شبیه سازی های متعدد، این موضوع به اثبات رسید. همچنین به دلیل معلوم نبودن مقادیر برخی از پارامترهای الگوریتم های شناسایی و جداسازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها توسعه یافته و بر روی ربات دولینکی پیاده سازی شده است. الگوریتم های مورد بررسی بر اساس روش بانداگراف، که یک روش گرافیکی برای مدل سازی است، می باشند و باقیمانده ها با توجه به مدل بانداگراف ربات استخراج شده اند.

در انتها نیز با استخراج مدل بانداگراف برای ربات موازی کابلی و استفاده از الگوریتم های ارائه شده شناسایی و جداسازی خطا برای این ربات انجام پذیرفته است. در شبیه سازی انجام گرفته خطاهای ایجاد شده که شامل مقاومت الکتریکی موتور و همچنین ضریب اصطکاک در بلبرینگ می باشد، با معرفی نشانگری به نام باقیمانده برای هر خطا شناسایی شده و با تغییر هر کدام نشانگر مربوطه تغییر خواهد کرد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که باقیمانده های بدست آمده می توانند خطای ایجاد شده را تشخیص دهند و همچنین منشا آن را به صورت یکتا تعیین نمایند. همچنین وجود این خطاها سبب ایجاد انحراف در موقعیت مجری نهایی می شود. اثرات تغییر انحراف مسیر مجری نهایی در اثر ایجاد خطا در مقاومت الکتریکی بسیار کمتر از دو خطای دیگر است.

## کلمات کلیدی

ربات موازی کابلی، شناسایی و جداسازی خطا، مدل سازی بانداگراف

## فهرست مطالب

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| فصل ۱: مقدمه                       | ۱  |
| ۱-۱ مقدمه                          | ۲  |
| ۲-۱ پژوهش های انجام گرفته          | ۳  |
| ۱-۲-۱ تشخیص و جداسازی خطا          | ۳  |
| ۲-۲-۱ مدل سازی ربات ها با باندگراف | ۸  |
| ۳-۱ اهداف پژوهش                    | ۹  |
| ۴-۱ خلاصه ای از فصول پایان نامه    | ۱۰ |

### ۱۱ فصل ۲: تشخیص و شناسایی خطا در یک سیستم رباتیکی

|   |    |
|---|----|
| ۱-۲ مقدمه   | ۱۲ |
| ۲-۲ باندگراف  | ۱۲ |
| ۳-۲ استفاده از دیدگاه باندگراف  | ۱۳ |
| ۴-۲ یک ربات دو لینکی  | ۱۶ |
| ۲-۴-۲ شبیه سازی   | ۲۱ |
| ۱-۲-۴-۲ سناریوی اول   | ۱  |
| ۲-۲-۴-۲ سناریوی دوم   | ۷  |
| ۵-۲ بررسی شناسایی و جداسازی خطا با وجود عدم قطعیت پارامتری                | ۳۰ |
| ۲-۵-۲ شبیه سازی برای عدم قطعیت پارامتری                                   | ۳۳ |
| ۳-۵-۲ تحلیل مقادیر اندازه گیری شده از سنسورها برای یک مدار الکتریکی R-L-C | ۳۶ |
| ۴-۵-۲ شبیه سازی در حالت وجود خطا در سنسورها                               | ۳۷ |
| ۶-۲ نتیجه گیری  | ۴۱ |

### ۴۳ فصل ۳: تشخیص و جداسازی خطا برای یک ربات موازی کابلی

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| ۱-۳ مقدمه                     | ۴۴ |
| ۲-۳ مدل سازی ربات موازی کابلی | ۴۴ |
| ۳-۳ استخراج مدل سینماتیکی     | ۴۵ |
| ۴-۳ شبیه سازی                 | ۵۱ |
| ۵-۳ استخراج مدل دینامیکی ربات | ۵۳ |
| ۶-۳ دینامیک مستقیم ربات       | ۶۵ |
| ۷-۳ شناسایی و جداسازی خطا     | ۶۷ |
| ۱-۷-۳ استخراج مدل باندگراف    | ۶۸ |

|    |  |       |
|----|--|-------|
| ۷۲ | ..... تحلیل اثر محرکه دوار بر روی حرکت ربات              | ۲-۷-۳ |
| ۷۶ | ..... استخراج باقیمانده ها برای ربات موازی کابلی         | ۸-۳   |
| ۷۷ | ..... الگوریتم معادلات تشخیص خطا                         | ۲-۸-۳ |
| ۷۸ | ..... استخراج معادلات با در نظر گرفتن عدم قطعیت          | ۳-۸-۳ |
| ۷۹ | ..... شناسایی و جداسازی با دو خطا                        | ۴-۸-۳ |
| ۸۳ | ..... استخراج معادلات با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم | ۵-۸-۳ |
| ۸۴ | ..... شبیه سازی نتایج                                    | ۶-۸-۳ |
| ۸۸ | ..... شبیه سازی برای دو خطا                              | ۷-۸-۳ |
| ۹۰ | ..... نتیجه گیری   | ۹-۳   |
| ۹۰ | ..... پیشنهادها برای کارهای آینده                        | ۱۰-۳  |
| ۹۱ | ..... اثبات ممان اینرسی                                  |       |
| ۹۵ | ..... منابع  |       |

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) نحوه اعمال دو علت و معلولی بر روی باندگراف ..... ۱۴
- شکل (۲-۲) ربات دو لینکی صفحه ای، [۲۷] ..... ۱۶
- شکل (۳-۲) مدل باندگراف موتور الکتریکی ربات دو لینکی ..... ۱۸
- شکل (۴-۲) اضافه کردن سنسور به باندگراف برای تشخیص امکان جداسازی خطا ..... ۱۸
- شکل (۵-۲) تعیین مسیرها بین ورودی سنسورها به ورودی خطاها ..... ۱۹
- شکل (۶-۲) نمودار تغییرات باقیمانده  $r_1$  مقاومت الکتریکی ..... ۲۲
- شکل (۷-۲) مقدار باقیمانده مرتبط با اصطکاک بلبرینگ ها ..... ۲۳
- شکل (۸-۲) مقدار باقیمانده مرتبط با فنریت محور ..... ۲۴
- شکل (۹-۲) میزان تغییرات ولتاژ ورودی موتور در هنگام بروز خطا ..... ۲۵
- شکل (۱۰-۲) تغییرات ورودی وارد بر سیستم متأثر از ترم های غیر خطی میله اول ..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲) جریان موتور الکتریکی ..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲) سرعت زاویه ای موتور الکتریکی ..... ۲۶
- شکل (۱۳-۲) سرعت زاویه ای لینک اول ربات ..... ۲۷
- شکل (۱۴-۲) نتایج سناریوی دوم ، (الف) جریان الکتریکی موتور، (ب) سرعت زاویه ای موتور، (ج) سرعت زاویه ای لینک اول، (د) ولتاژ ورودی موتور، (چ) ورودی وارد بر سیستم متأثر از ترم های غیر خطی ..... ۲۸
- شکل (۱۵-۲) باقیمانده ها در سناریوی دوم، (الف) مرتبط با مقاومت الکتریکی، (ب) مرتبط با میرایی بلبرینگ، (ج) مرتبط با فنریت محور ..... ۲۹
- شکل (۱۶-۲) مدار التریکی R-L-C ..... ۳۰
- شکل (۱۷-۲) باندگراف مرتبط با مدار الکتریکی R-L-C، [۱۶] ..... ۳۱
- شکل (۱۸-۲) باندگراف مدار الکتریکی R-L-C با در نظر گرفتن عدم قطعیت ..... ۳۱
- شکل (۱۹-۲) باقیمانده و حد بالا و پایین برای سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت بدون در نظر گرفتن خطا ..... ۳۳
- شکل (۲۰-۲) مقدار باقیمانده و حد بالا و پایین عدم قطعیت ها با در نظر گرفتن خطا در مقاومت الکتریکی ..... ۳۴
- شکل (۲۱-۲) مقدار باقیمانده و حد بالا و پایین عدم قطعیت ها با در نظر گرفتن خطا در مقاومت الکتریکی ..... ۳۵
- شکل (۲۲-۲) مقدار باقیمانده و همچنین حد بالا و پایین عدم قطعیت ها بدون وجود خطا در سیستم ..... ۳۷
- شکل (۲۳-۲) باقیمانده مدار R-L-C و حد بالا و پایین عدم قطعیت با وجود خطا در مقاومت الکتریکی ..... ۳۸
- شکل (۱-۳) ربات موازی کابلی مورد مطالعه ..... ۴۴

- شکل (۲-۳) موقعیت قرار گیری سه موتور بر روی صفحه افقی ..... ۴۶
- شکل (۳-۳) موقعیت گوشه های صفحه متحرک ..... ۴۶
- شکل (۴-۳) مسیر در نظر گرفته شده برای ربات ..... ۵۱
- شکل (۵-۳) مسیر طی شده گوشه های صفحه متحرک ..... ۵۲
- شکل (۶-۳) تغییر طول هر یک از کابل ها ..... ۵۲
- شکل (۷-۳) سرعت خطی کابل ها ..... ۵۳
- شکل (۸-۳) مسیر حرکت صفحه متحرک ..... ۵۷
- شکل (۹-۳) نیروی کششی کابل ها ..... ۵۸
- شکل (۱۰-۳) نیروی عملگری جک ..... ۵۹
- شکل (۱۱-۳) تغییر طول کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر ..... ۶۰
- شکل (۱۲-۳) سرعت خطی کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر ..... ۶۰
- شکل (۱۳-۳) نیروی کششی در هر کابل ..... ۶۱
- شکل (۱۴-۳) طول کابل ها برای طی مسیر مورد نظر ..... ۶۲
- شکل (۱۵-۳) سرعت خطی کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر ..... ۶۲
- شکل (۱۶-۳) نیروی کششی هر کابل جهت طی مسیر مورد نظر ..... ۶۳
- شکل (۱۷-۳) تغییر طول کابل ها ..... ۶۴
- شکل (۱۸-۳) سرعت خطی کابل ها ..... ۶۴
- شکل (۱۹-۳) نیروی کششی هر یک از کابل ها ..... ۶۵
- شکل (۲۰-۳) ارتفاع صفحه متحرک و وضعیت دورانی آن بعد از اعمال نیروهای مورد نظر ..... ۶۶
- شکل (۲۱-۳) سرعت صفحه متحرک ..... ۶۷
- شکل (۲۲-۳) مدل باندگراف ربات موازی کابلی با در نظر گرفتن سه موتور ..... ۶۹
- شکل (۲۳-۳) مدل باندگراف در نرم افزار 20sim ..... ۷۱
- شکل (۲۴-۳) تغییر ارتفاع صفحه متحرک و وضعیت دورانی این صفحه ..... ۷۲
- شکل (۲۵-۳) اثر ضریب اصطکاک بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور x ..... ۷۳
- شکل (۲۶-۳) اثر ضریب اصطکاک بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور y ..... ۷۳
- شکل (۲۷-۳) اثر ضریب اصطکاک بلبرینگ بر روی تغییر ارتفاع صفحه متحرک ..... ۷۴
- شکل (۲۸-۳) اثر مقاومت بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور x ..... ۷۴
- شکل (۲۹-۳) اثر مقاومت بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور y ..... ۷۵
- شکل (۳۰-۳) اثر مقاومت بر روی تغییر ارتفاع صفحه متحرک ..... ۷۵
- شکل (۳۱-۳) نمودار باندگراف ربات و اتصال سنسور جهت بررسی الگوریتم های شناسایی ..... ۸۰
- شکل (۳۲-۳) ارتباط بین سنسورها و ورودی خطاها ..... ۸۱
- شکل (۳۳-۳) مسیر حرکت صفحه متحرک ..... ۸۵
- شکل (۳۴-۳) سرعت زاویه موتور الکتریکی ..... ۸۶
- شکل (۳۵-۳) گشتاور ورودی به موتور الکتریکی ..... ۸۶
- شکل (۳۶-۳) مقدار باقیمانده مرتبط با مقاومت الکتریکی ..... ۸۷

- شکل (۳-۳۷) باقیمانده مرتبط با خطای مقاومت الکتریکی ..... ۸۹
- شکل (۳-۳۸) باقیمانده مرتبط با ضریب اصطکاک بلبرینگ ..... ۸۹
- شکل الف ۱. مثلث مورد نظر جهت استخراج ممان اینرسی ..... ۹۱
- شکل الف ۲. نحوه المان انتخاب شده جهت استخراج ممان اینرسی ..... ۹۲
- شکل الف ۳. المان انتخاب شده جهت استخراج ممان اینرسی ..... ۹۳

### فهرست جدول‌ها

- جدول (۲-۱) پارامترهای مرتبط به مدلسازی ربات دو لینکی ..... ۱۷
- جدول (۲-۲) پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی ..... ۲۲



# فصل ۱: مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

امروزه شناسایی و جداسازی خطا یک موضوع مهم در طراحی و بکارگیری تمامی سیستم های موجود در سیستم های صنعتی می باشد. در مهندسی فرایند این موضوع بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین این موضوع جزء ارکان اصلی مدیریت اتفاقات پیش بینی نشده می باشد که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مدیریت اتفاقات پیش بینی نشده به تشخیص به موقع، شناسایی نوع آن، و تصحیح شرایط غیر معمول از خطاها در سیستم می پردازد. تعیین و تشخیص سریع خطا، در حالی که سیستم هنوز در مرحله عملکرد قابل کنترل است، می تواند از آسیب های بیشتر که صدمات غیر قابل جبرانی را به سیستم وارد می کند، جلوگیری به عمل آورد.

به دلیل حوزه وسیع مسیله تشخیص خطای فرایند و همچنین پیچیدگی های موجود در حل برخط، دیدگاه های مبتنی بر روش های کامپیوتری در سال های اخیر توسعه پیدا کرده اند. در مطالعات سال های اخیر روش های ارائه شده حوزه وسیعی از تکنیک ها مانند روش های اولیه که بر استفاده از گراف ها و درخت های خطا بوده است، دیدگاه های عددی، و سیستم های مبتنی بر دانش، و شبکه های عصبی را در بر می گیرد. از منظر مدلسازی، روش های زیادی وجود دارد که نیاز به وجود مدل دقیق سیستم یا مدل های نیمه ریاضی یا مدل های کیفی دارند. در سوی دیگر، روش های زیادی وجود دارند که از هیچ مدلی استفاده نمی کنند و تنها بر اطلاعات گذشته سیستم تکیه می کند. به علاوه، اگر اطلاعات و داده های فرایند مشخص باشد، روش های جستجوی خطای مختلفی وجود دارد که می توان برای انجام تشخیص به کار برد. با این وجود امروزه بیشتر بر روی دیدگاه های تحلیلی کار می شود.

شناسایی و جداسازی خطا در یک سیستم باعث افزایش امنیت و قابلیت اطمینان آن شده و هزینه های بهره برداری را کاهش می دهد. این فرایند شناسایی و جداسازی خطا هم می تواند به صورت

دستی انجام شود و هم می تواند به صورت اتوماتیک انجام پذیرد. در سال های اخیر علاقمندی بسیاری چه از منظر صنعتی و چه از منظر اکادمیک به این موضوع وجود داشته است. روش های تشخیص خطا به دو دسته ی گرافیکی و جبری تقسیم می شوند و برای استفاده در سیستم های خطی و غیر خطی مناسب هستند. روش های گرافیکی به دلیل شیء گرا بودن بر روش های جبری برتری دارند. یکی از بهترین روش های تشخیص و جداسازی خطا به روش گرافیکی استفاده از باندگراف است.

## ۲-۱ پژوهش های انجام گرفته

در این بخش به مرور پژوهش های انجام گرفته در زمینه تشخیص و جداسازی خطا در ربات ها پرداخته می شود. در بخش اول، به کارهای انجام گرفته در حوزه تشخیص و جداسازی خطا پرداخته می شود و سپس پژوهش های صورت پذیرفته در حوزه جداسازی خطا در ربات ها پرداخته می شود.

### ۱-۲-۱ تشخیص و جداسازی خطا

فرایند تشخیص و جداسازی خطا که در سیستم های نظارتی صنعتی اجرا می شود، از طریق مقایسه بین رفتار واقعی سیستم و رفتار مورد انتظار یا مرجع آن انجام می پذیرد. دیدگاه های مختلفی برای شناسایی و جداسازی خطا توسعه یافته است که بر اساس نوع دانش که برای توصیف مدل استفاده می شوند، طبقه بندی می گردند. شناسایی و جداسازی خطا می تواند به طور کلی به دو دسته تقسیم شود که عبارتند از مبتنی بر مدل، و غیر مبتنی بر مدل. روش جداسازی و شناسایی خطا مبتنی بر مدل نیاز به یک مدل دقیق ریاضی دارد که رفتار سیستم را پیش بینی می کند. اما مدل سازی به دلیل پیچیدگی سیستم مورد مطالعه و همچنین تجهیزات کنترلی یک مرحله مهم و سخت می باشد. مدل سازی باند گراف یک روش مدل سازی چند ناحیه ای انرژی است که برای توسعه مدل های

سیستم های مهندسی فرایند مورد استفاده قرار می گیرد، [۱، ۲]. همچنین مدل سازی باندگراف در گذشته برای توسعه دیدگاه های مختلف شناسایی و جداسازی خطا استفاده شده است، [۳]. همچنین برخی ویژگی های کنترلی مانند کنترل پذیری، مشاهده پذیری به راحتی با تحلیل روابط علت و معلولی از روی مدل باندگراف قابل استنباط می باشد. از این اطلاعات می توان برای تعیین مکان بهینه سنسورها، و تعیین میزان افزونگی سخت افزاری بهره جست. تحلیل مسیرهای علت و معلولی امکان تعیین معادلات سیستم و همچنین حل مشکلات مرتبط با ارزیابی های عددی را فراهم می کند. به علاوه از ویژگی های علت معلولی که از روی باند گراف قابل اثبات است، می توان به سرمنشا خطا پی برد.

فرایند شناسایی و جداسازی خطا از طریق ارزیابی قوانین مرتبط با قیود فیزیکی موجود بر روی سیستم عمل می کند که برای این منظور از اطلاعات سنسوری و همچنین مقدار عددی پارامترها که از سیستم مورد نظر استخراج می شود، بهره گرفته می شود. دیدگاه روابط افزونگی تحلیلی<sup>۱</sup>، دیدگاه مشاهده محور، [۴]، و معادلات برابری، [۵]، سه دیدگاه مهم در شناسایی و جداسازی خطا مبتنی بر مدل می باشند، [۶، ۷]. در روش روابط افزونگی تحلیلی قیودی بین متغیرهای معلوم مختلف سیستم ( پارامترها، مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر مرجع) در فرایند برقرار می شود. به بیان دیگر، روابط افزونگی تحلیلی قیود استاتیکی یا دینامیکی می باشند که مقادیر معلوم سیستم را در بستر زمان هنگامی که سیستم در شرایط نرمال عملکردی است، به هم مرتبط می سازند. هنگامی که روابط افزونگی طراحی گردید، فرایند تشخیص خطا در هر لحظه چک می کند که آیا این روابط برقرار هستند یا نه و هنگامی که این روابط برقرار نیستند، فرایند جداسازی خطا مشخص می کند که کدام جزء از اجزای سیستم دچار خطا شده است. برای اینکه فرایند شناسایی و جداسازی خطا به درستی

---

<sup>۱</sup> Analytical redundancy relations (ARR)

دارای عملکرد باشد، روابط افزونگی تحلیلی باید به درستی استخراج شده باشند و به خطا حساس باشند و همچنین عدم حساسیت به ورودی های غیر متداول و همچنین اغتشاشات وارد بر سیستم داشته باشند، [۸].

در سال های اخیر تشخیص و جداسازی خطا به یک موضوع پراهمیت در سیستم های کنترل اتوماتیک مبدل شده است. اهمیت آن به دلیل ارتقاء ایمنی، قابلیت اعتماد و ارزش عملکردی سیستم می باشد. به این دلایل است که در سال های اخیر به عنوان موضوع پژوهشی انتخاب شده است و چندین روش همانطور که در بالا تشریح گردید بدین منظور توسعه یافته است. برخی از این روش ها بر اساس مدل دینامیکی می باشند. بر اساس معادلات استفاده شده شناسایی و جداسازی خطا بر اساس دیدگاه های مدل محور به طور اساسی به دو دسته گرافیکی و جبری تقسیم بندی می شوند. از میان روش های جبری می توان روش های را یافت که بر اساس تیوری مدول می باشند. همه این روش ها شناسایی و جداسازی خطا را به عنوان یک مسئله مشاهدهگر خطا نسبت به ورودی ها و خروجی های خطا در نظر می گیرد. این روش ها چه به سیستم های خطی، [۹]، و چه به سیستم های غیر خطی اعمال شده اند، [۱۰]. اغلب مقالاتی که از این روش بهره جسته اند بیشتر بر روی خطاهای مرتبط با عملگرها و سنسورها توجه نموده اند.

به علاوه، روش های گرافیکی، که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است، بر اساس مدل ساختاری از سیستم است تا بتوان با آنها استراژی های شناسایی و جداسازی خطا را بسط داد. در واقع، ویژگی های ساختاری بدست آمده از مدل گرافیکی مستقلا برای مقادیر پارامترها کاربردی است. این روش ها اساسا بر پایه دیاگراف هایی هستند که با  $G(S, A)$  نشان داده می شود که یک شماتیک از معادلات حالت می باشند جایی که گره های  $S$  متغیرهای حالت، ورودی و خروجی های اندازه گیری شده می باشند و  $A$  ارتباط دو طرفه میان متغیرها را مشخص می کند، [۱۱].

گره های s تنها متغیرهای حالت، ورودی و خروجی را نمایش نمی دهند اما همچنین اجزای فیزیکی سیستم را نیز نشان می دهند. آنها همچنین انتقال انرژی بین اجزای فعال و غیر فعال در سیستم های چند فیزیکی را نیز توصیف می کنند. آنها همچنین مترجم بین مدل فیزیکی و معادلات ریاضی می باشند. تفاوت بین بانداگراف و روش های گرافیکی دیگر این است که بانداگراف به طور مستقیم از سیستم فیزیکی تولید می شوند نه معادلات فضای حالت. بنابراین از روی بانداگراف می توان معادلات حالات را بدست آورد.

اخیراً پژوهش های فراوانی در زمینه ی طراحی سیستم های شناسایی و جداسازی خطا صورت گرفته است، که در ادامه به برخی از آنها اشاره می گردد. بن موسی و هم کاران، از روش بانداگراف برای شناسایی و جداسازی خطای خودروها استفاده نمودند، [۱۲]. آنها در تحقیق خود از جنبه های الکترونیکی و مکانیکی، ساختار سیستم مورد نظر را با بانداگراف مدل سازی و شبیه سازی کردند که این روش می تواند در تشخیص خطاهای سیستم های مبتنی بر خودرو کارآمد باشد. نتایج تحقیق آنها نسبت به روش هایی که تا کنون مطرح شده بود، بهبود قابل ملاحظه ای داشته است. بروتزکی، [۱۳]، از روش بانداگراف برای مدل سازی و طراحی سیستم تشخیص خطا در سیستم های ترکیبی استفاده نمودند. وی در تحقیق خود موفق شد که با استفاده از روش بانداگراف و نرم افزار شبیه سازی، فرآیند تحلیل سیستم و طراحی مدل های تشخیص خطا را در سیستم های ترکیبی پیاده سازی نماید. نتایج تحقیق وی نسبت به روش هایی که تا قبل از سال ۲۰۱۵ بر روی سیستم های ترکیبی ارائه شده بود بهبود قابل توجهی داشته است. کافرئیز و همکاران، [۱۴] از روش بانداگراف برای تشخیص و شناسایی خطاهای احتمالی در درب های سیستم قطارهای ریلی استفاده نمودند. آنها در تحقیق خود موفق شدند با روش بانداگراف، مدل و طراحی سیستم تشخیص خطا را برای درب های قطارهای ریلی طراحی نمایند که به میزان قابل توجهی در تشخیص خطاها و ارائه بازخوردهای لازم در هنگام بروز خطا نقش ایفا نماید. لیو و یو از روش بانداگراف برای تشخیص خطاها در سیستم های محرک

الکترومکانیکی استفاده نمودند و با بهره گیری از روش افزونگی تحلیلی جهت شناسایی و جداسازی خطا و انجام شبیه سازی عملکرد الگوریتم ارائه شده را ارزیابی نموده اند، [۱۵]. مایانک و همکاران، اخیراً تشخیص خطای قوی با عدم تعریف ارزش در نمودار باندگراف مطرح نمودند، [۱۶]. آن‌ها از باندگراف جهت تشخیص خطا در سیستم‌های فشار قوی استفاده نمودند. آن‌ها در تحقیق خود با انجام شبیه‌سازی مدل تشخیص خطا را طراحی نموده و به پاسخ قابل قبولی رسیدند. محمد صادقی و همکاران، یک سیستم تشخیص خطا برای سوپرهیتر فشار قوی بویلر بازیاب حرارتی یکی از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی کشور با استفاده از روش باندگراف طراحی نموده اند، [۱۷]. بخش سوپرهیتر فشار قوی بویلر بازیاب حرارتی یکی از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی کشور، ابتدا مدل‌سازی شده است و پس از ارزیابی صحت مدل‌سازی، یک سیستم تشخیص خطا بر اساس روش باندگراف، پیشنهاد و طراحی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روش باندگراف نتایج بسیار خوبی را جهت شناسایی خطا در این سیستم‌ها فراهم می‌کند. دوازده امامی و همکاران مدل‌سازی دینامیکی یک شیر کنترل پنوماتیکی با روش باندگراف را توسعه داده اند، [۱۸]. مدل باندگراف و معادلات عمل‌گر یک شیر کنترل ارائه و تاثیر پارامترهای سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش جرم قطعات متحرک و همچنین افزایش ضریب اصطکاک باعث کاهش زمان نشست سیستم (زمان پاسخ دائم سیستم) می‌شود. مجلل و لطفی فرد به طراحی یک سیستم شناسایی و جداسازی خطا مبتنی بر روش باندگراف هیبرید برای یک توربین بادی که با ژنراتوری با تغذیه‌کننده دوبله کار می‌کند، پرداخته اند، [۱۹]. صحت و سرعت خطایابی و جداسازی خطاهای الکتریکی، مکانیکی و هیدرولیکی از نتایج شبیه‌سازی این مقاله استنتاج می‌گردد. چنگ و هوانگ به طراحی یک سیستم تشخیص و جداسازی خطای مقاوم برای محرکه‌ی الاستیک با متغیر فعال - غیرفعال ربات‌های سری پرداخته اند، [۲۰]. نیو و همکاران به طراحی یک روش شناسایی و جداسازی خطا مبتنی بر باندگراف پرداخته اند، [۲۱]. این روش بر روی واحد کنترل اکولایزر پنوماتیکی برای قطارهایی که ترمزهای

پنوماتیکی آن‌ها با سیستم الکترونیکی کار می‌کنند، پیاده‌سازی شده است. نتایج آزمایش‌های عملی، نشان‌دهنده‌ی کارایی این روش است که حاصل آن پاسخ زمانی و هشدارهای اشتباه کم‌تر سیستم خواهد بود. بواماما و هم‌کاران به تشخیص و ایزوله‌سازی خطا با استفاده از روش بانداگراف برای محرکه‌های هوشمند پرداخته‌اند. روش ارائه شده یک روش کلی برای تمام تجهیزات هوشمند است که در این‌جا به طور اختصاصی برای محرکه‌های هوشمند استفاده شده است، [۳].

## ۱-۲-۲ مدل‌سازی ربات‌ها با بانداگراف

همانطور که تشریح گردید روش بانداگراف یک روش مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی می‌باشد. از این روش در حوزه‌های مختلف جهت مدل‌سازی سیستم‌های مختلف استفاده شده است. یکی از حوزه‌هایی که به پژوهش پیش‌رو بیشتر مرتبط است، حوزه رباتیک می‌باشد که از بانداگراف جهت مدل‌سازی استفاده شده است. جی و همکاران یک مدل بانداگراف ربات چرخدار را برای توسعه الگوریتم‌های شناسایی و جداسازی ارائه داده‌اند، [۲۲]. همچنین برای مطالعه ربات‌های اسکلت خارجی مدل بانداگراف از ساختار اسکلتی یک پا توسعه یافته است، [۲۳]. همچنین نحوه به کارگیری مدل‌سازی بانداگراف در سیستم‌های مکاترونیک نیر توسط گائوسروپ توسعه یافته است، [۲۴]. همچنین مدل بانداگراف یک بازوی رباتیکی موازی سه درجه آزادی توسط برا و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است، [۲۵]. همچنین راگسیولا و همکاران مدل بانداگراف یک پای رباتیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند، [۲۶].

با بررسی پژوهش‌های انجام شده طبق دانش نگارنده، پژوهشی که به طور ویژه به استخراج مدل بانداگراف ربات موازی کابلی بپردازد، یافت نشده است. و در این پژوهش به عنوان یک نوآوری مدل بانداگراف یک ربات موازی کابلی استخراج می‌شود.

### ۳-۱ اهداف پژوهش

شناسایی و جداسازی خطا به روش‌های مختلف گرافیکی و جبری صورت می‌پذیرد که روش‌های گرافیکی به دلیل شیء گرا بودن کاربردی‌تر هستند. همچنین روش‌های گرافیکی گوناگونی برای این کار وجود دارد که یکی از آن‌ها باندگراف است. باندگراف نه تنها متغیرهای ورودی، خروجی و حالت را بیان می‌کند، بلکه اجزای فیزیکی سیستم را نیز نمایش می‌دهد. این روش که می‌توان از آن به عنوان مدل رابط بین مدل فیزیکی و ریاضی سیستم یاد کرد، انتقال توان بین اجزای فعال و غیر فعال سیستم را نیز نشان می‌دهد. مزیت عمده‌ی این روش بر سایر روش‌های گرافیکی این است که به طور مستقیم از فیزیک مسئله به دست می‌آید در صورتی که سایر روش‌ها از معادلات حالت استخراج می‌شوند. علاوه بر این، روش باندگراف برای سیستم‌هایی با چند دامنه‌ی انرژی، مانند سیستم‌های مکترونیکی، بسیار مناسب است.

این پژوهش به شناسایی و جداسازی خطا به روش باندگراف در ربات موازی کابلی می‌پردازد. در این پژوهش ابتدا یک مدل باندگراف از ربات موازی کابلی مورد مطالعه استخراج می‌شود و سپس یک روش شناسایی و جداسازی خطا که مبتنی بر باندگراف است جهت شناسایی خطاها که شامل پارامترهای سیستم مانند مقاومت الکتریکی موتور، ضریب اصطکاک در موتور و همچنین ضریب میرایی فنر می‌باشد، توسعه داده می‌شود. در این روش باقیمانده‌ها بر اساس مدل باندگراف محاسبه می‌شوند. باقیمانده‌ها یک شاخص برای وجود خطا در سیستم می‌باشند که هنگامی که صفر هستند بیانگر عدم وجود خطا و هنگامی که تغییر می‌کنند نشانگر وجود خطا در سیستم می‌باشند. این باقیمانده‌ها برای خطا مجزا می‌باشند و باقیمانده یک خطا تنها از تغییر آن خطا تاثیر می‌پذیرد. ویژگی که این روش دارد این است که تنها با محاسبه این باقیمانده‌ها می‌توان به وجود یک خطا در سیستم دست پیدا نمود که این باقیمانده‌ها تابع پارامترهای سیستم و متغیرهای اصلی سیستم می‌باشند.

باشد که توسط سنسورها اندازه گیری می شوند. اما عیب اصلی آن وابسته بودن به مدل است که باید پارامترهای سیستم مشخص باشد به منظور حل این موضوع از روش شناسایی و جداسازی خطا در حضور عدم قطعیت پارامترهای سیستم استفاده شده است که بتوان این مشکل را حل نمود.

## ۴-۱ خلاصه ای از فصول پایان نامه

بعد از معرفی و مرور پژوهش های پیشین در حوزه ربات های موازی کابلی و همچنین تشخیص خطا، در فصل دوم به معرفی روش بانداگراف، الگوریتم های شناسایی و جداسازی خطا با استفاده از این روش پرداخته می شود. در فصل سوم این پایان نامه مدل دینامیکی ربات موازی کابلی استخراج شده و الگوریتم های ارائه شده در فصل دوم برای شناسایی و جداسازی خطا بر روی آن پیاده سازی می شود و نتایج حاصله تحلیل خواهد شد.

## **فصل ۲: تشخیص و شناسایی خطا**

### **در یک سیستم رباتیکی**

## ۱-۲ مقدمه

در این بخش ابتدا شناسایی و جداسازی خطا به صورت عمومی توضیح داده می شود و سپس برای یک ربات دو لینکی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس مفهوم جداسازی و شناسایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مورد بحث قرار گرفته و شناسایی و جداسازی بر این اساس برای ربات دو لینکی انجام می پذیرد.

## ۲-۲ باندگراف

باندگراف یک دیدگاه تیوری گراف ها است که برای مطالعه و تحلیل ساختار سیستمی که مستقل از مقادیر پارامترهای سیستم هستند، استفاده می شود. این دیدگاه به محاسبات کم نیاز دارد که این موضوع این امکان را فراهم می آورد که سیستم هایی با اندازه خیلی بزرگ مانند سیستم های نیروگاهی مدلسازی شود. یک باندگراف یک نمایش گرافیکی از سیستم دینامیکی فیزیکی می باشد این نمودار از باند ها و المان های اولیه تشکیل شده است. هر باند، انتقال توان بین المان های متصل شده را نشان می دهد. این توان تبادل شده بوسیله یک نیمه پیکان نمایش داده می شود که حامل دو متغیر مکمل به نام های تلاش (e) و جریان (f) می باشد در حالی که جهت جریان توان به وسیله نوک پیکان نشان داده می شود.

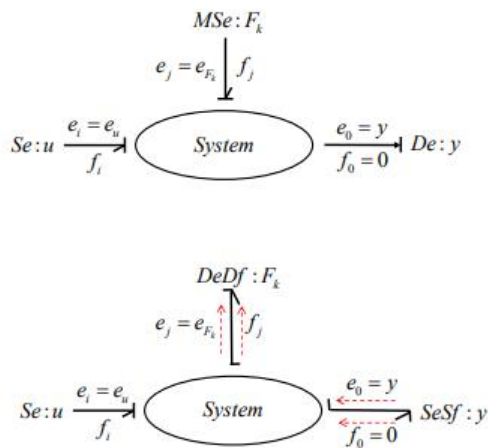
در نمایش باندگراف، المان های اولیه را می توان با مجموعه  
 $S = \{RUCUIUTFUGYUSeUSfUDeUDfUMSeUMSf\}$  نمایش داد. المان R پدیده اتلاف غیرفعال انرژی را نشان می دهد که به عنوان نمونه اگر سیستم الکتریکی داشته باشیم همان مقاومت الکتریکی است. در حالی که C و I المان های ذخیره انرژی غیرفعال می باشند. TF و GY برای نمایش ترانسفررها و ژیراتورها استفاده می شوند. ورودی های سیستم با استفاده از ورودی

تلاش (Se,Mse) و منبع جریان (Sf,Msf) نمایش داده می شود. Msf ورودی جریان قابل تغییر و MSE ورودی تلاش قابل تغییر می باشد. اتصال ۱ برای در کنار هم قرار دادن المان هایی که دارای جریان یکسان می باشند، استفاده شده در حالی که اتصال O برای در کنار هم قرار دادن المان هایی که دارای تلاش یکسان هستند، استفاده می شود. همچنین برای اندازه گیری جریان در المان ۱ از Df و برای اندازه گیری تلاش در المان O از De استفاده می گردد.

در کنار بهره برداری از بانداگراف جهت مدل سازی سیستم های فیزیکی، خاصیت علت و معلولی و همچنین ساختاری آن سبب می گردد که برای مطالعه برخی از خواص کنترلی مانند مشاهده پذیری، کنترل پذیری و جداسازی ورودی-خروجی استفاده شوند.

## ۳-۲ استفاده از دیدگاه بانداگراف

در این بخش به شناسایی و جداسازی خطا با بهره گیری از بانداگراف پرداخته می شود. جهت شناسایی و جداسازی خطا ابتدا باید حلقه های بانداگراف تشریح شود. حلقه های بانداگراف، کوتاهترین مسیرهایی غیر مشترکی هستند که ورودی تا خطا را به یکدیگر متصل می کنند. سپس جهت تشخیص خطا دو علت و معلولی در این مسیرهها بر روی بانداگراف اعمال می شود که چگونگی اعمال آن در نشان شکل (۱-۲) داده شده است.



شکل (۱-۲) نحوه اعمال دو علت و معلولی بر روی باندگراف

در واقع با تحمیل متغیرهای جریان/ انرژی به وسیله المان SeSf و توزیع اطلاعات دو علت و معلولی، متغیر خطا  $e_{f_k}$  نتیجه خواهد شد. برای یک سیستم با تعداد q خطا و p سنسور، حلقه های باندگراف برای تشخیص خطا، به روی مجموعه ای از کوتاهترین مسیرهای علت معلولی از خطا به خروجی اعمال می شود. یک مسیر علت و معلولی در نمایش باندگراف به صورت مجموعه ای از متغیرهای تلاش و جریان که به طور سلسه مراتبی در کنار یکدیگر قرار گرفته و شرایط علت و معلولی سیستم را برقرار می کنند گفته می شود. مراحل بدست آوردن حلقه های باندگراف برای تشخیص خطا به صورت زیر است:

**مرحله ۱:** تعیین یک مجموعه  $\Phi$  از کوتاهترین مسیرهای علت و معلولی غیر مشترک بین ورودی متغیرهای خطا و خروجی خطا بر روی یک مدل باندگراف در علت معلولی انتگرالی

**مرحله ۲:** اتصال منبع مرتبط با ورودی خطا به المان DeDf و یک المان Sesf به متغیر خروجی برای هر مسیر علت و معلولی از مجموعه  $\Phi$

**مرحله ۳:** یافتن مسیرهای علت و معلولی از المان Sesf به المان DeDf بر روی کوتاهترین مسیر.

و تکرار مراحل ۱ و ۲ و برای همه مسیرهای علت و معلولی از مجموعه  $\Phi$

مرحله ۴: انتخاب تمام المان های ذخیره انرژی بدون علت و معلولی و اتصال ترجیحا علت و معلولی انتگرالی را به آنها

در ادامه شرایط قابل تشخیص بودن و جداپذیر بودن خطا به صورت زیر بیان می شود:

اگر تمامی المان های ذخیره انرژی بر روی حلقه های مدل باندگراف علت و معلولی مشتقی را بپذیرند، متغیر خطا نسبت به ورودی  $u$  و مقدار خروجی  $y$  قابل تشخیص است. تعداد  $q$  خطا به طور ساختاری جداپذیر است اگر و تنها اگر تعداد  $q$  عدد مسیر علت و معلولی غیر مسترک که سنسور را به خروجی خطا متصل کند و از همه المان های ذخیره انرژی مرتبط با آن مسیر عبور کند، [۱۲].

استخراج معادلات نمایشگر خطا: هنگامی که خطا یک سیستم قابل مشاهده و همچنین جدا پذیر باشد می توان از روی مدل باندگراف نمایشگرهای خطا را بدست آورد. این نمایشگر ها از شناسایی تمامی مسیرهای علت و معلولی که خروجی را به ورودی خطا متصل می کنند، بدست می آیند. مجموع ضرایب این مسیرها، معادله نشانگر خطا را به صورت زیر نتیجه می دهد:

$$F = \sum_i G_i u + \sum_j G_j y \quad (1-2)$$

جایی که داریم  $G_i$  ضرایب مسیر علت و معلولی  $i$ -ام که ورودی را به ورودی خطا متصل می نماید و  $G_j$  ضرایب مسیر علت و معلولی  $j$ -ام که خروجی را به ورودی خطا متصل می نماید. برای ارزیابی نمایشگر خطای بدست آمده، باقیمانده  $r$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$r = S^{-n} \frac{d^n}{ds} F \quad (2-2)$$

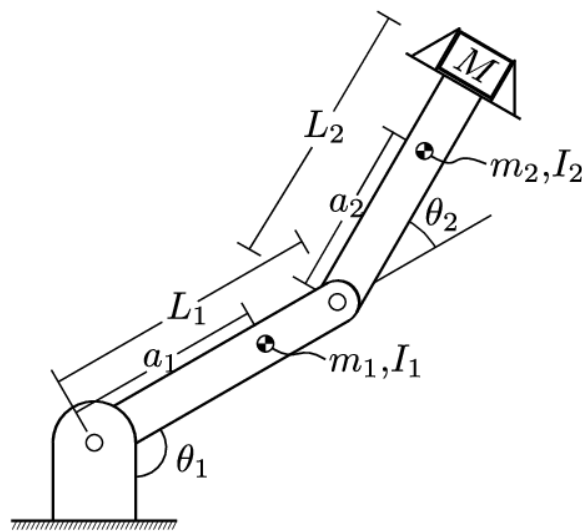
که انتگرال گرفته شده نقش فیلتر را در سیستم ایفاء می کنند. به طور خلاصه فرایند شناسایی و جداسازی خطا برای یک سیستم به صورت زیر است:

- استخراج مدل باند گراف سیستم مورد نظر

- اضافه نمودن منابع قابل تغییر مرتبط با اجزای قابل مشاهده
- چک نمودن اینکه خطای مورد نظر قابل تشخیص و جداسازی است
- محاسبه نشانگر خطا برای سیستم

## ۴-۲ یک ربات دو لینکی

یک ربات دو لینکی صفحه ای مطابق شکل (۲-۲) در نظر بگیرید.



شکل (۲-۲) ربات دو لینکی صفحه ای، [۲۷]

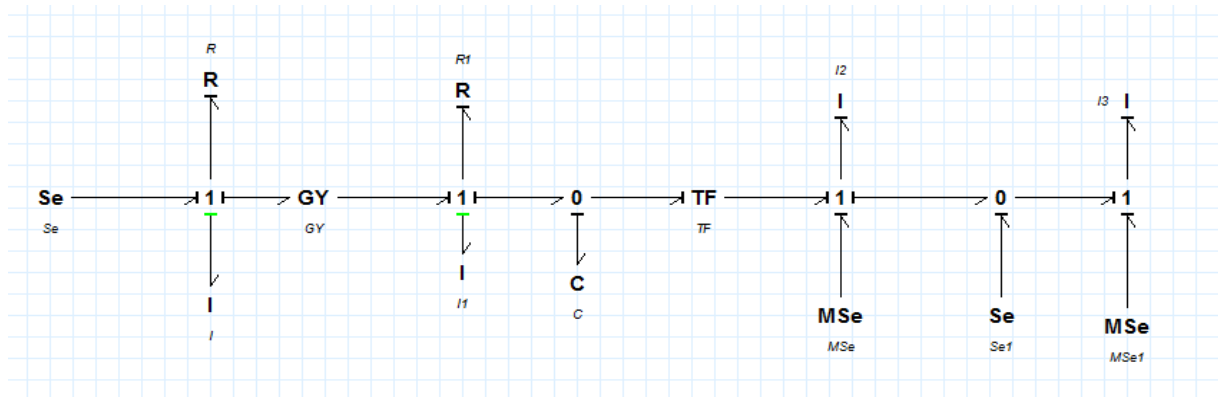
در اینجا یک موتور الکتریکی برای لینک اول در نظر گرفته شده است که مدل مکانیکی و الکتریکی آن در نظر گرفته شده است. خطاهایی که برای این سیستم در نظر گرفته شده است، شامل مقاومت الکتریکی موتور، مقدار ضریب اصطکاک بلبرینگ، و همچنین سفتی شفت می باشد. برای قابلیت شناسایی و جداسازی آنها از روش استفاده شده در [۱۲] استفاده می شود که یک روش گرافیکی برای تشخیص شناسایی و جداسازی خطا می باشد. همچنین با شبیه سازی انجام گرفته این موضوع

نیز به اثبات رسیده است. برای سیستم ربات پارامترهای در نظر گرفته شده مطابق جدول (۲-۱) می باشد.

جدول (۲-۱) پارامترهای مرتبط به مدلسازی ربات دو لینکی

| نام پارامتر | توضیحات                         | واحد                  | نام پارامتر | توضیحات                                 | واحد    |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|-------------|---|---------|
| $L$         | ضریب القایی موتور               | H                     | $\tau_2$    | گشتاور اعمالی به مفصل دوم               | Nm      |
| $R_e$       | مقاومت الکتریکی موتور           | $\Omega$              | $U_f$       | ترم های غیرخطی معادله دینامیکی میله اول | Nm      |
| $k_e$       | ضریب ثابت موتور                 | Nm/A                  | $y_1$       | جریان موتور                             | A       |
| $F_m$       | اصطکاک بلبرینگ ها               | Nms/rad               | $y_2$       | سرعت زاویه ای حرکت موتور                | rad/sec |
| $J_m$       | ممان اینرسی موتور               | Nms <sup>2</sup> /rad | $y_3$       | سرعت زاویه ای میله اول                  | rad/sec |
| $J_1$       | ممان اینرسی میله اول            | Nms <sup>2</sup> /rad | $U_0$       | مقدار ولتاژ ورودی به موتور              | volt    |
| $K$         | سختی میله خروجی موتور به گیربکس | Nms/rad               |             |   |         |
| $N$         | نسبت تبدیل چرخدنده              | -                     |             |   |         |

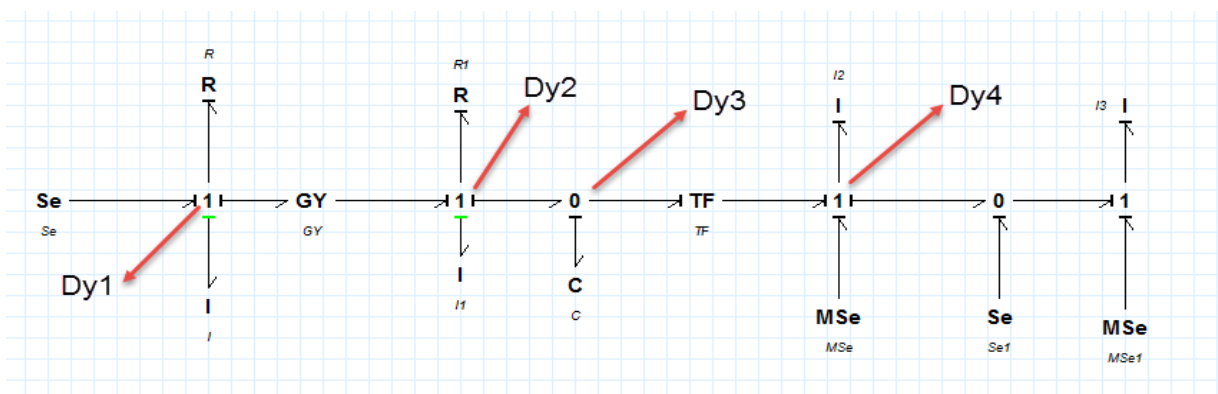
بدین منظور مدل باندگراف ربات دو لینکی مطابق شکل (۳-۲) می باشد.



شکل (۳-۲) مدل باندگراف موتور الکتریکی ربات دو لینکی

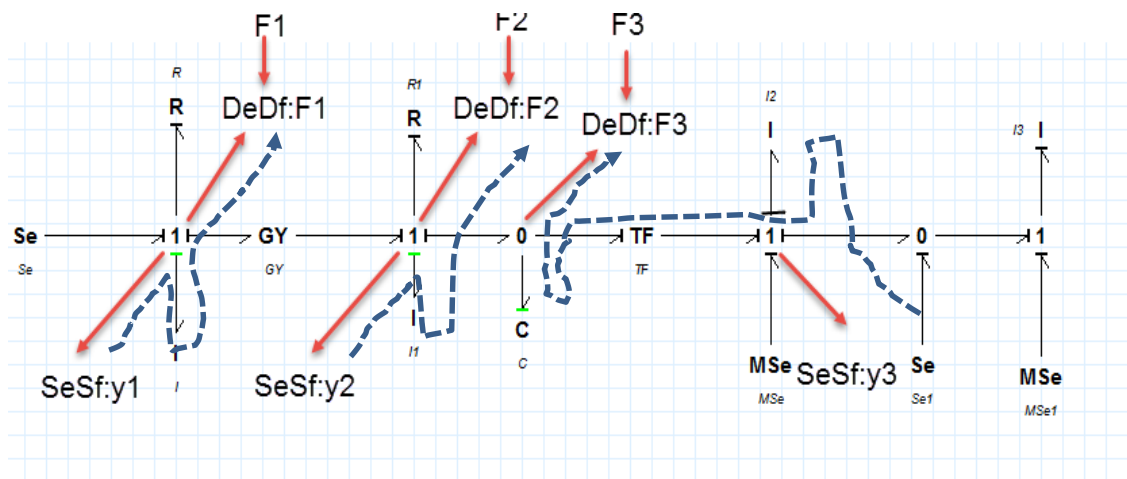
در مدل باندگراف نشان داده شده در شکل (۳-۲) که شامل سه بخش می باشد، یک بخش معادلات مرتبط به مدار الکتریکی موتور می باشد. بخش دیگر مرتبط به معادلات مکانیکی مرتبط با موتور می باشد و در انتها نیز معادلات مرتبط با ربات دو لینکی می باشد. تمامی پارامترهای بکار رفته در مدل باندگراف در قسمت قبل معرفی شدند ولی شاید یک پارامتری که در این جا وجود دارد Mse می باشد که در حقیقت بیانگر ورودی متغیری است که تابع پارامترهای سیستم می باشد.

در مدل بالا، ترم های غیر خطی که همان معادلات دینامیکی مرتبط با میله اول است، به صورت ورودی قابل تغییر (Mse) به مدل باندگراف وارد شده است. حال با در نظر گرفتن سه خطای مقاومت الکتریکی، ضریب اصطکاک موتور، و سفتی محور قسمت اول مدل باند گراف به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۴-۲) اضافه کردن سنسور به باندگراف برای تشخیص امکان جداسازی خطا

سنسورها در حقیقت همان مقادیری هستند که قابل اندازه گیری می باشند در یک سیستم واقعی می توان جریان الکتریکی موتور و سرعت زاویه ای خروجی موتور را می توان اندازه گیری کرد و همانطور که می دانیم جریان در اتصال ۱ برابر می باشد و بنابراین با اتصال سنسور به دو اتصال ۱ می توان جریان الکتریکی و سرعت زاویه ای موتور را اندازه گیری کرد. برای تشخیص و جداسازی خطا داریم:



شکل (۵-۲) تعیین مسیرها بین ورودی سنسورها به ورودی خطاها

در حقیقت باید مسیرهای علت معلولی که ورودی را به خروجی متصل می کنند و غیر مشترک هستند را پیدا نمود. با توجه به بانداگراف رسم شده چون سه خطا داریم، سه مسیر علت و معلولی که هیچ اشتراکی ندارند را مشاهده می کنیم. از آنجا که تمامی المان های ذخیره انرژی در این مسیر خطاها، علت و معلولی مشتقی می پذیرند، بنابراین تمامی خطاها طبق قضایای ارائه شده در قسمت قبل قابل شناسایی است و از طرف دیگر با توجه به شکل (۵-۲) از آنجا که سه مسیر مجزا که هیچ اشتراکی ندارند از ورودی سنسورها یعنی  $y1$  و  $y2$  و  $y3$  به ورودی خطاها وجود دارد که این مسیرها بر طبق روابط علت و معلولی می باشد و در طول مسیر خود از المان های ذخیره انرژی عبور می کنند، بنابراین خطاها قابل جداسازی است. حال با توجه به مدل بانداگراف بدست آمده می توان باقیمانده برای خطای مقاومت موتور را به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned}
F_1 &= \left( L \frac{d}{dt} + R_e \right) y_1 + k_e y_2 - U_0 \\
F_2 &= -k_e y_1 + (F_m + J_m \frac{d}{dt}) y_2 + \frac{1}{N} \left( \tau_2 + U_f + J_1 \frac{d}{dt} y_3 \right) \\
F_3 &= y_2 - N y_3 - \frac{1}{NK} \frac{d}{dt} \left( \tau_2 + U_f + J_1 \frac{d}{dt} y_3 \right)
\end{aligned} \tag{۳-۲}$$

حال با توجه به رابطه (۳-۲)۰، مقدار باقیمانده در فضای لاپلاس از رابطه زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned}
r_1 &= \frac{1}{s} \frac{d\hat{F}_1}{ds} \\
r_2 &= \frac{1}{s} \frac{d\hat{F}_2}{ds} \\
r_3 &= \frac{1}{s^2} \frac{d^2 \hat{F}_3}{ds^2}
\end{aligned} \tag{۴-۲}$$

جایی که با تبدیل لاپلاس از رابطه (۳-۲)۰ داریم:

$$\begin{aligned}
\hat{F}_1 &= (Ls + R_e) \hat{y}_1 + k_e \hat{y}_2 - \hat{U}_0 - y_1(0) \\
\hat{F}_2 &= -k_e \hat{y}_1 + (F_m + J_m s) \hat{y}_2 + \frac{1}{N} (\hat{\tau}_2 + \hat{U}_f + J_1 s \hat{y}_3) \\
\hat{F}_3 &= \hat{y}_2 - N \hat{y}_3 - \frac{1}{NK} s (\hat{\tau}_2 + \hat{U}_f + J_1 s \hat{y}_3)
\end{aligned} \tag{۵-۲}$$

با جایگذاری رابطه (۵-۲) در رابطه (۴-۲) داریم:

$$\begin{aligned} \hat{r}_1 &= \left( \frac{L}{s} \right) \hat{y}_1 + (Ls + R_e) \frac{1}{s} \frac{d\hat{y}_1}{ds} + k_e \frac{1}{s} \frac{d\hat{y}_2}{ds} - \frac{1}{s} \frac{d\hat{U}_0}{ds} \\ \hat{r}_2 &= \frac{1}{s} \left( -k_e \frac{d\hat{y}_1}{ds} + (F_m + J_m s) \frac{d\hat{y}_2}{ds} + J_m \hat{y}_2 + \frac{1}{N} \left( \frac{d\hat{\tau}_2}{ds} + \frac{d\hat{U}_f}{ds} + J_1 s \frac{d\hat{y}_3}{ds} + J_1 \hat{y}_3 \right) \right) \\ \hat{r}_3 &= \frac{1}{s^2} \left( \frac{d^2 \hat{y}_2}{ds^2} - N \frac{d^2 \hat{y}_3}{ds^2} - \frac{2}{NK} \left( \frac{d\hat{\tau}_2}{ds} + \frac{d\hat{U}_f}{ds} + J_1 s \frac{d\hat{y}_3}{ds} + J_1 \hat{y}_3 \right) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{NK} s \left( \frac{d^2 \hat{\tau}_2}{ds^2} + \frac{d^2 \hat{U}_f}{ds^2} + J_1 \frac{d\hat{y}_3}{ds} + J_1 s \frac{d^2 \hat{y}_3}{ds^2} + J_1 \frac{d\hat{y}_3}{ds} \right) \right) \end{aligned} \quad (6-2)$$

با لاپلاس معکوس از رابطه (۶-۲) داریم:

$$\begin{aligned} r_1 &= -Lty_1 + \int (Ly_1 - R_e \lambda y_1 - k_e \lambda y_2 + \lambda U_0) d\lambda \\ r_2 &= -J_m ty_2 - \frac{J_1}{N} ty_3 + \int \left( k_e \lambda y_1 - F_m \lambda y_2 + J_m y_2 - \frac{1}{N} \lambda \tau_2 - \frac{1}{N} \lambda U_f - \frac{J_1}{N} y_3 \right) d\lambda \\ r_3 &= -t^2 \frac{y_3}{NK} + \int \left( -\left( \frac{1}{NK} \right) (\lambda^2 \tau_2 + \lambda^2 U_f) + \left( \frac{4 \times J_1}{NK} \right) \lambda y_3 \right) d\lambda \\ &\quad + \int \int \left( \alpha^2 y_2 - N \alpha^2 y_3 + \left( \frac{2}{NK} \right) (\alpha \tau_2 + \alpha U_f) - \left( \frac{2 \times J_1}{NK} \right) y_3 \right) d\alpha d\lambda \end{aligned} \quad (7-2)$$

## ۲-۴-۲ شبیه سازی

در شبیه سازی انجام شده مقدار هر یک از  $r_1$  و  $r_2$  و  $r_3$  محاسبه می شود که در هنگام عدم وجود خطا یا سالم بودن مقدار آنها برابر صفر است و در هنگام وجود خطا مقدار آن تغییر می کند که شبیه سازی ها در قسمت بعد انجام شده است. در این مسئله سه باقیمانده برای هر یک از خطا وجود دارد که مقدار آن در بخش بعدی برای دو سناریو تعریف شده و محاسبه می شوند.

### ۱-۲-۴-۲ سناریوی اول

فرض می شود که

- در زمان  $t=10 \text{ sec}$  مقدار مقاومت موتور از مقدار  $R_e = 1.32$  به مقدار  $R_e = 1.2$  تغییر کند.

- در زمان  $t=20 \text{ sec}$  مقدار اصطکاک بلبرینگ از مقدار  $F_m=0.2237$  به مقدار  $F_m=0.2137$  تغییر کند.

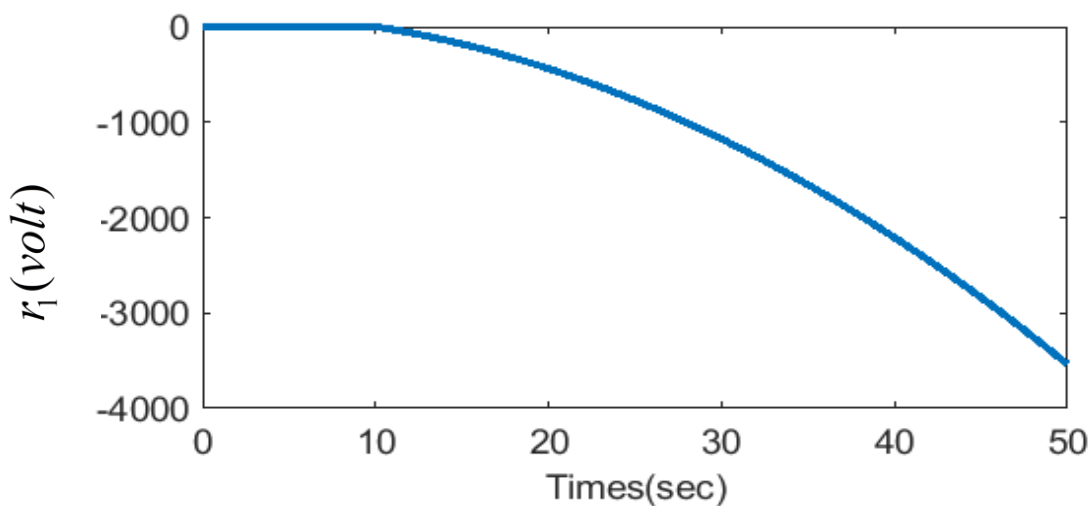
- در زمان  $t=30 \text{ sec}$  مقدار سختی شفت از مقدار  $K=10000$  به مقدار  $K=100$  تغییر کند.

در این حالت از کنترل PI بر روی ولتاژ ورودی استفاده شده است. مقدار پارامترهای مورد نیاز مطابق جدول (۲-۲) انتخاب شده است.

جدول (۲-۲) پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی

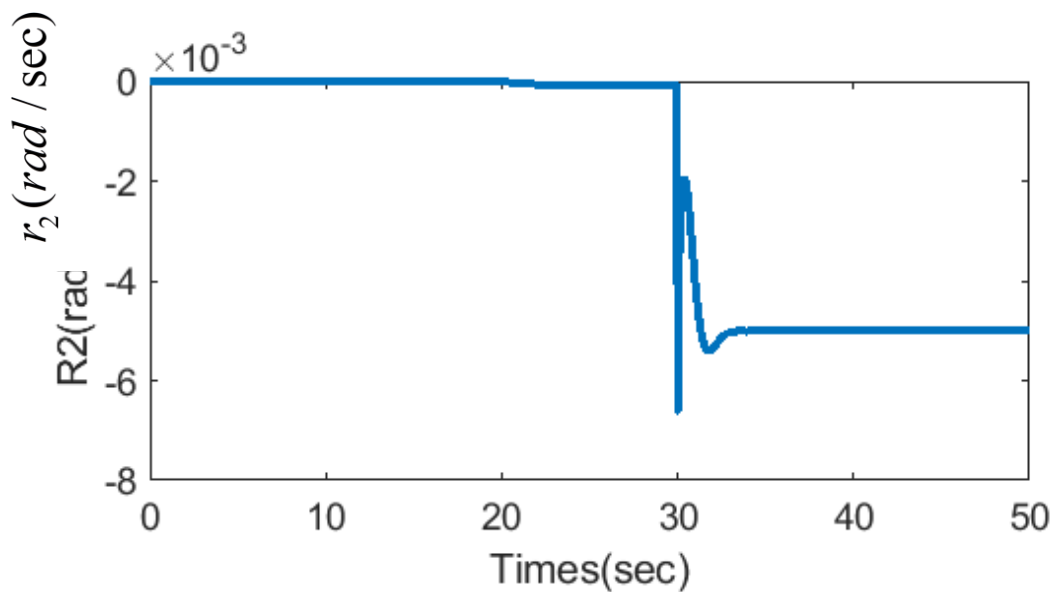
|       |                             |
|-------|-----------------------------|
| $R_e$ | 1.32 ( $\Omega$ )           |
| $L$   | 2.32 (H)                    |
| $K_e$ | 0.0655 Nm/A                 |
| $J_m$ | 0.002 Nms <sup>2</sup> /rad |
| $F_m$ | 0.2237 Nms/rad              |
| $K$   | $10^4$ Nm/rad               |
| $N$   | 13                          |
| $M_1$ | 5 kg                        |
| $M_2$ | 5 kg                        |
| $k_p$ | 25                          |
| $K_v$ | 5                           |
| $L_1$ | 1                           |
| $L_2$ | 0.5                         |

نمودار تغییرات مقدار باقیمانده مربوط به مقاومت الکتریکی در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.



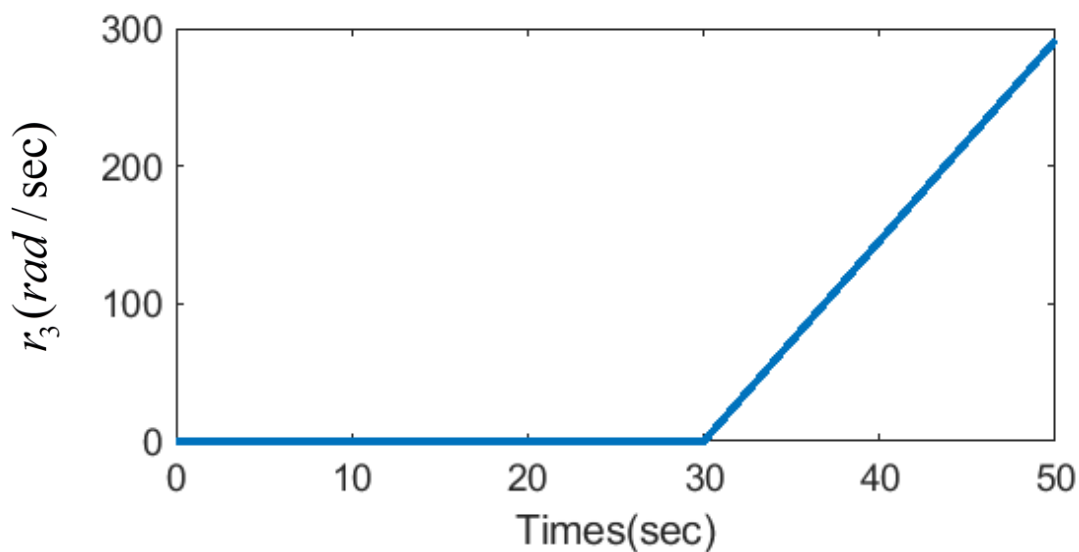
شکل (۲-۶) نمودار تغییرات باقیمانده  $r_1$  مقاومت الکتریکی

همانطور که در شکل (۶-۲) مشاهده می شود، تا زمان ۱۰ ثانیه مقدار باقیمانده صفر می باشد. از این زمان به بعد، مقدار باقیمانده شروع به افزایش می کند که نشان می دهد که خطای مرتبط با مقاومت الکتریکی در سیستم وجود دارد این نمودار تغییر باقیمانده است نه تغییر مقدار مقاومت الکتریکی و مقدار باقیمانده تنها با پارامترهای اندازه گیری شده تغییر می کند.



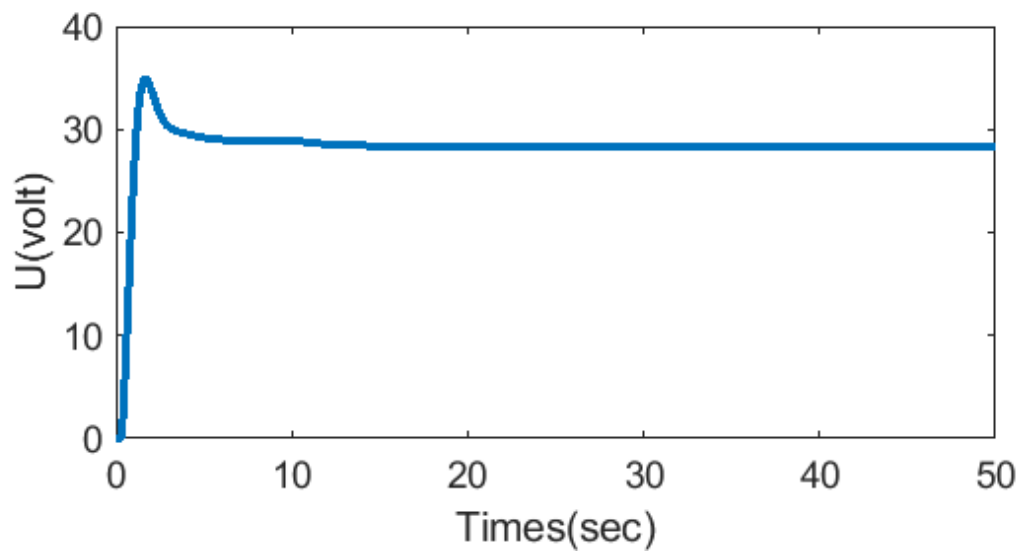
شکل (۷-۲) مقدار باقیمانده مرتبط با اصطکاک بلبرینگ ها

در شکل (۷-۲) مقدار باقیمانده مرتبط با اصطکاک بلبرینگ ها نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است مقدار باقیمانده تا ثانیه ۲۰ صفر می باشد این بدان معنی است تغییرات مقاومت بر این باقیمانده اثری ندارد ولی از ثانیه ۲۰ به بعد که تغییرات مرتبط با اصطکاک رخ می دهد، مقدار باقیمانده تغییر می کند و نشان دهنده وجود خطا در سیستم می باشد مقدار تغییر آن که افزایش یا کاهش می یابد مهم نیست همین که مقدار آن تغییر می کند دارای اهمیت است که این موضوع را بیان می کند که خطا در سیستم وجود دارد.

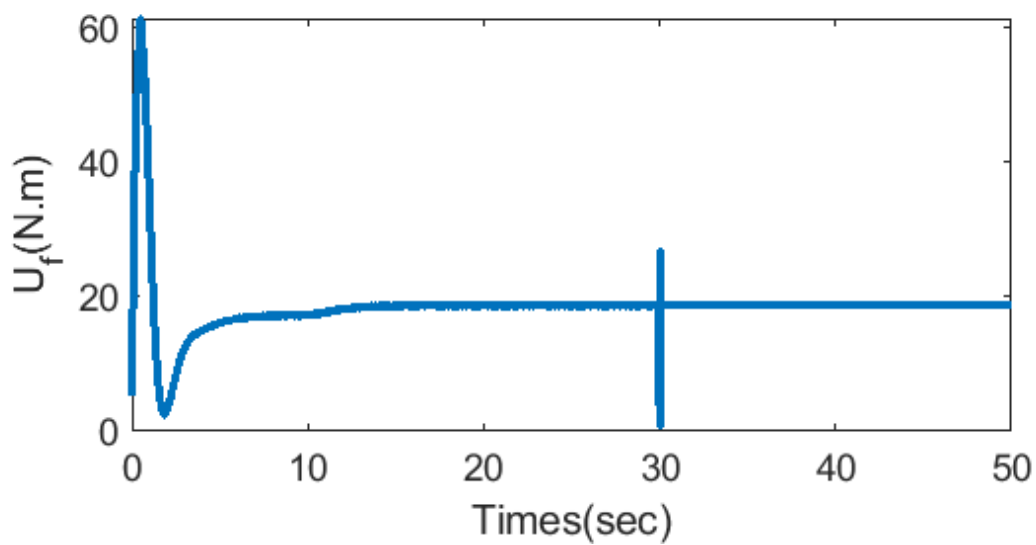


شکل (۸-۲) مقدار باقیمانده مرتبط با فنریت محور

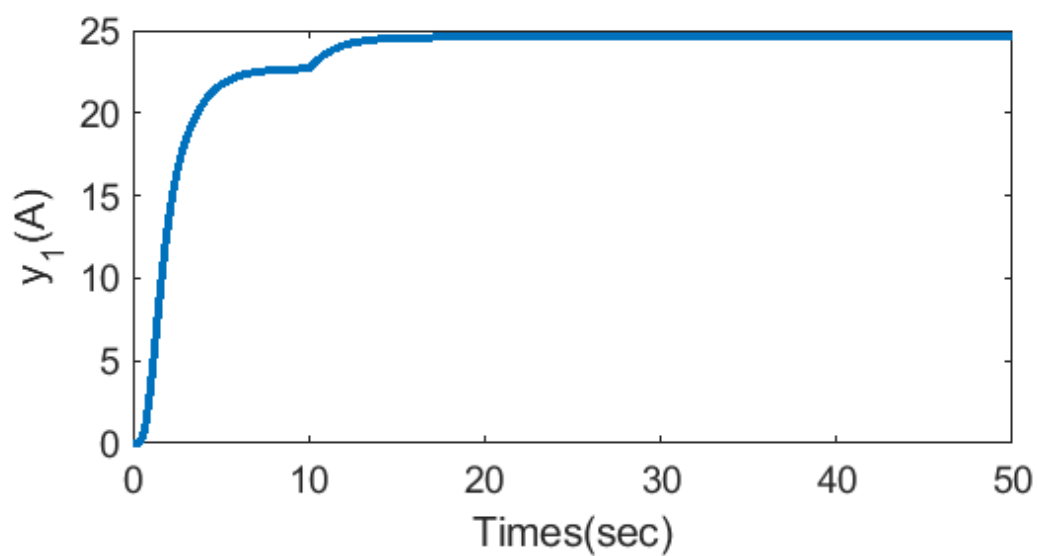
مقدار باقیمانده مرتبط با فنریت محور در شکل (۸-۲) نشان داده شده است. این بیانگر این است که مقدار باقیمانده تا ثانیه ۳۰ صفر است که از عدم تاثیرپذیری خطای مقاومت و ضریب اصطکاک بلبرینگ ها بر روی این باقیمانده حکایت دارد. بنابراین به طور کلی می توان نتیجه گرفت که مقدار خطا برای هر سه تا ثانیه ۱۰ صفر می باشد و از آن زمان که خطا اعمال می شود، مقدار باقیمانده زیاد می شود و نشان می دهد که داخل سیستم خطایی وجود داد و چون  $r_1$  مربوط به مقاومت موتور می باشد بنابراین به اپراتور نشان می دهد که مقاومت موتور دچار خطا شده است. در زمان ۲۰ ثانیه  $r_2$  زیاد می شود که نشان می دهد که خطایی در بلبرینگ موتور ایجاد شده است و در زمان ۳۰ ثانیه نیز مقدار باقیمانده سوم زیاد می شود که نشان می دهد که شفت موتور دچار خطا شده است. نتیجه ای که از بخش گرفته می شود این است که سه باقیمانده معرفی شدند که هر کدام معرف یک خطا بودند. حالا با سناریوی طراحی شده و ایجاد خطا در سیستم، این سه خطا مستقل از یکدیگر هستند و با ایجاد خطا در سیستم این باقیمانده ها تغییر می کنند.



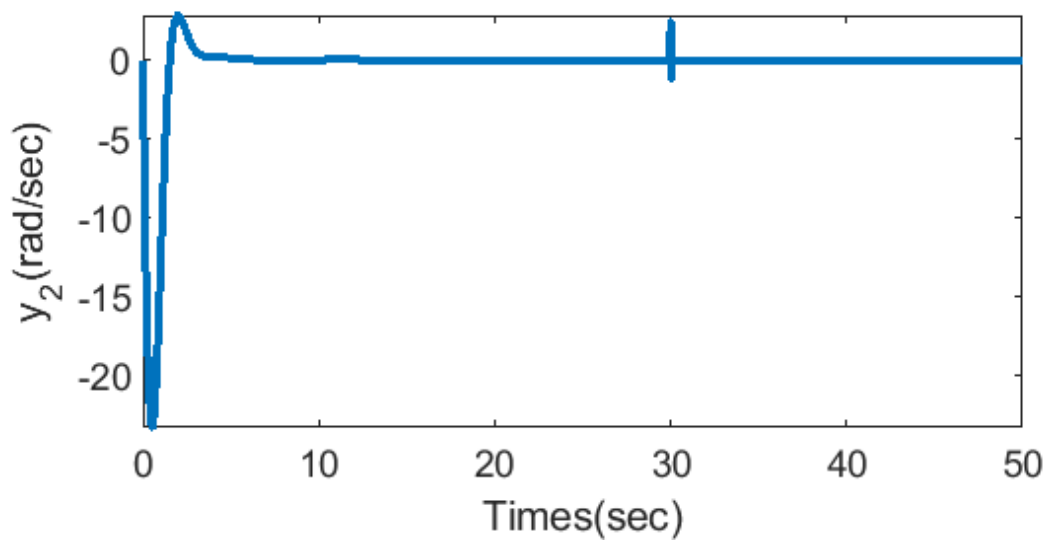
شکل (۹-۲) میزان تغییرات ولتاژ ورودی موتور در هنگام بروز خطا



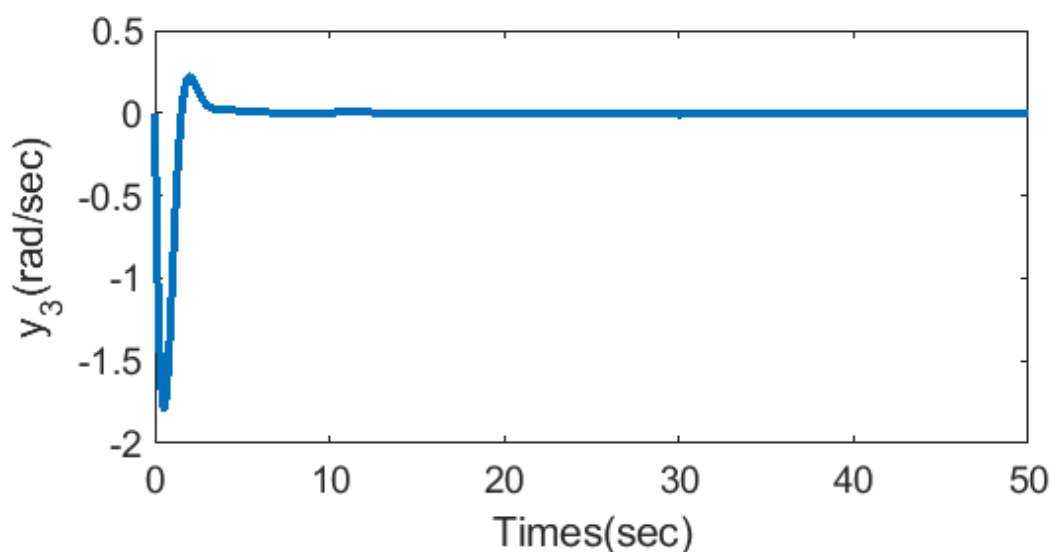
شکل (۱۰-۲) تغییرات ورودی وارد بر سیستم متأثر از ترم های غیر خطی میله اول



شکل (۱۱-۲) جریان موتور الکتریکی



شکل (۱۲-۲) سرعت زاویه ای موتور الکتریکی

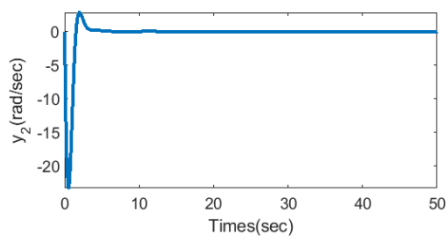


شکل (۲-۱۳) سرعت زاویه ای لینک اول ربات

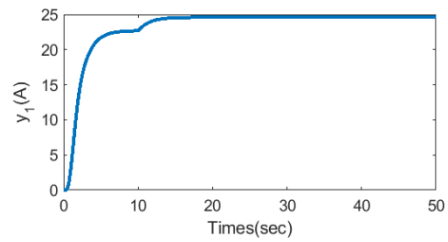
در شکل (۲-۹) و شکل (۲-۱۰) تغییرات ولتاژ و همچنین تغییرات ورودی به سیستم که ناشی از ترم های غیر خطی نشان داده شده است. همچنین تغییرات جریان موتور، سرعت زاویه ای موتور و همچنین سرعت زاویه ای میله اول در شکل (۲-۱۱) تا شکل (۲-۱۳) نشان داده شده اند. میزان تغییرات ورودی ولتاژ به دلیل تغییرات کم مقاومت خیلی کم می باشد اما میزان تغییرات بر روی  $U_f$  بسیار مشهود می باشد. نکته ای که باید در اینجا بدان اشاره نمود تنها خطاهای تعریف شده را می توان شناسایی و جداسازی نمود و برای شناسایی و جداسازی خطا دیگری به عنوان نمونه  $ke$  از این روش قابل شناسایی نیست مگر اینکه بتوان یک باقیمانده از روی بانداگراف برای آن محاسبه نمود.

#### ۲-۲-۴-۲ سناریوی دوم

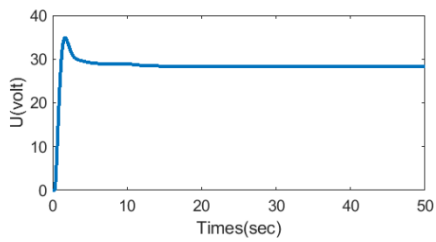
- فرض می شود که مقدار مقاومت موتور یک بار در ثانیه ۱۰ از مقدار ۱,۳۲ به ۱,۲ تغییر کرده و در ثانیه ۲۰ نیز از ۱,۲ به ۰,۸ تغییر نماید و خطایی در ضریب اصطکاک و فنریت محور ایجاد نمی شود.



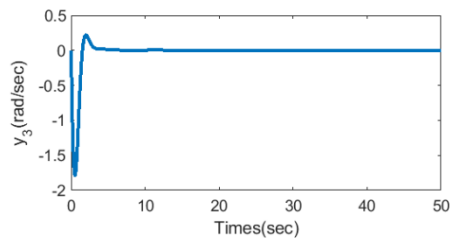
(ب)



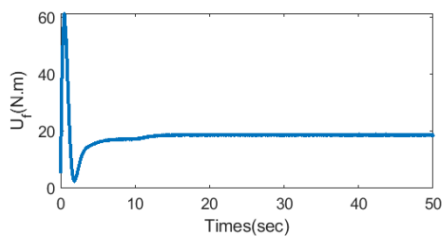
(الف)



(د)

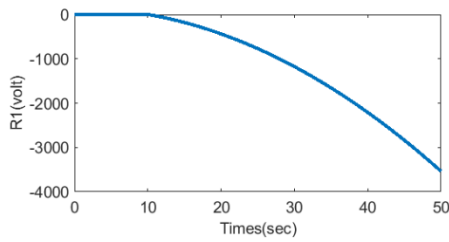


(ج)

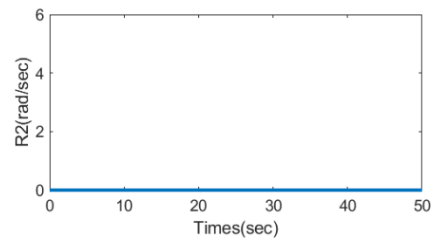


(چ)

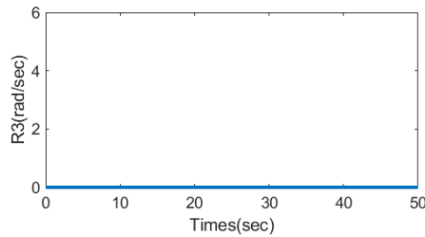
شکل (۲-۱۴) نتایج سناریوی دوم ، (الف) جریان الکتریکی موتور، (ب) سرعت زاویه ای موتور، (ج) سرعت زاویه ای لینک اول، (د) ولتاژ ورودی موتور، (چ) ورودی وارد بر سیستم متاثر از ترم های غیر خطی



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۲-۱۵) باقیمانده ها در سناریوی دوم، (الف) مرتبط با مقاومت الکتریکی، (ب) مرتبط با میرایی بلبرینگ، (ج)

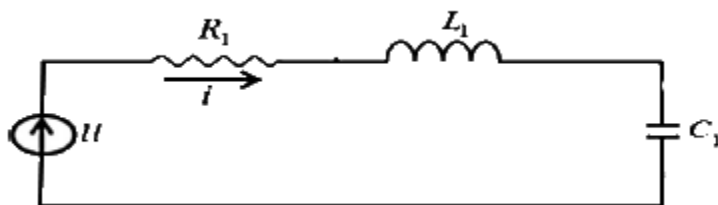
مرتبط با فنریت محور

جریان الکتریکی موتور، سرعت زاویه ای موتور و سرعت زاویه ای لینک اول در قسمت های الف تا ج از شکل (۲-۱۴) نشان داده شده اند. همچنین در این سناریو ولتاژ ورودی به موتور و همچنین ورودی ناشی از ترم های غیرخطی به ترتیب در قسمت د و چ از شکل (۲-۱۴) نشان داده شده اند. همچنین باقیمانده های مرتبط با مقاومت الکتریکی، ضریب اصطکاک، و فنریت محور در قسمت الف تا ج از شکل (۲-۱۵) نشان داده شده اند. همانطور که در شکل های بالا مشاهده می شود تنها مقدار باقیمانده مربوط به مقاومت موتور تغییر می کند و دو باقیمانده دیگر تغییر نمی کنند. همچنین میزان تغییرات ورودی و خروجی در نمودارها قابل مشاهده است. همانطور مشاهده می شود تغییرات میزان بر روی ورودی و خروجی های خیلی کم می باشد. نتیجه ای که از شبیه سازی سناریو دوم گرفته می شود وقتی که تنها یک خطا در سیستم ایجاد

می شود تنها باقیمانده مربوط به آن خطا تغییر می کند و باقیمانده خطاهای دیگر صفر هستند که این اثبات مفهوم جدپذیری خطاها با معرفی باقیمانده ها می باشد.

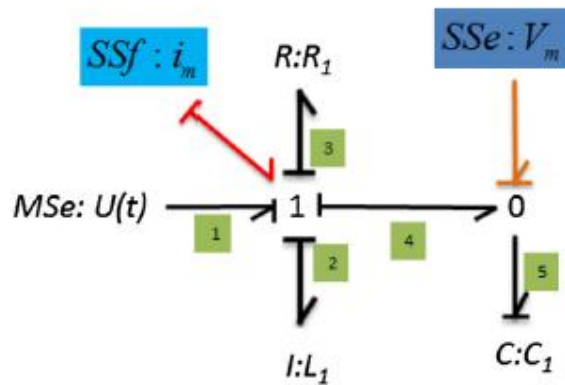
## ۵-۲ بررسی شناسایی و جداسازی خطا با وجود عدم قطعیت پارامتری

عدم قطعیت در مدل سازی سیستم ها وجود دارد و جز لاینفک سیستم ها می باشد و به راحتی نمی توان مقادیر دقیق پارامترهای سیستم را به دست آورد. در حالتی که عدم قطعیت در سیستم وجود ندارد به راحتی می توان باقیمانده ها را بدست آورد که این باقیمانده ها تابع پارامترهای سیستم و مقادیر اطلاعاتی است که از سنسورها به دست می آیند. اما در حالتی که پارامترهای سیستم دقیق نمی باشند، ولی محدوده پارامترها مشخص است، باید بتوان روشی ارائه کرد که با بهره گیری از آن بتوان وجود خطا داخل سیستم را شناسایی و جداسازی کرد. ابتدا برای مدل سازی عدم قطعیت داخل سیستم، از جبر بازه ای استفاده می شود. در ادامه استخراج معادلات مربوطه برای مدار الکتریکی RLC انجام می پذیرد. مدار الکتریکی مربوطه مطابق شکل (۱۶-۲) می باشد.



شکل (۱۶-۲) مدار التریکی R-L-C

که نمودار باند گراف مطابق شکل (۱۷-۲) می باشد.

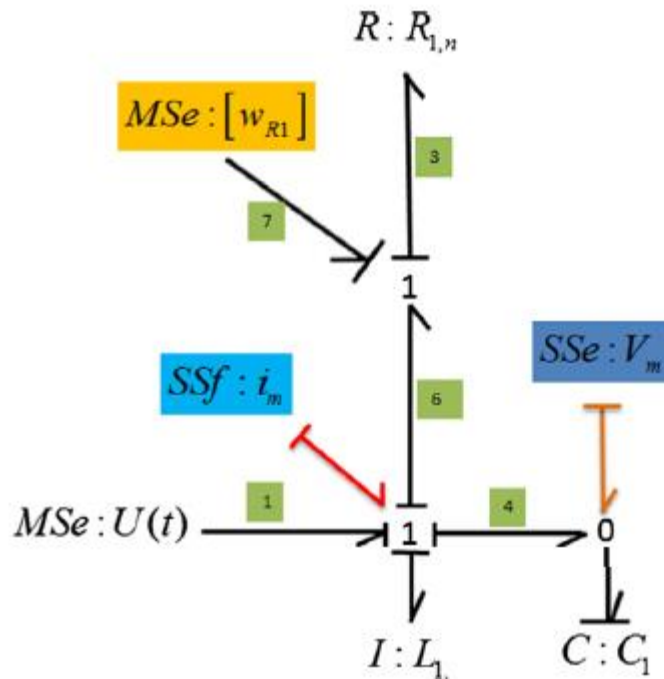


شکل (۲-۱۷) باندگراف مرتبط با مدار الکتریکی R-L-C، [۱۶]

حال اگر عدم قطعیتی بر روی مقدار  $R_1$  در نظر گرفته شود، با استفاده از جبر بازه ای داریم:

$$[R_{1,l}, R_{1,u}] = R_{1,n} (1 + [\delta_{R1,l}, \delta_{R1,u}]) \quad (۲-۸)$$

با لحاظ نمودن این عدم قطعیت، باندگراف مطابق شکل (۲-۱۸) می باشد.



شکل (۲-۱۸) باندگراف مدار الکتریکی R-L-C با در نظر گرفتن عدم قطعیت

که در شکل (۲-۱۸) ،  $w_{R1}$  یک ورودی مجازی قدرت می باشد که به علت وجود عدم قطعیت بر روی پارامتر در نمودار باندگراف اعمال شده است. حال می توان مقدار باقیمانده را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\left[ \underline{I_r} \quad \overline{I_r} \right] = I_{r_n} + \left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] \quad (۹-۲)$$

که در رابطه (۲-۹) با توجه به مدار الکتریکی مورد نظر داریم:

$$I_{r_{1,n}} = u(t) - L_1 \frac{d}{dt} \{i_m\} - R_{1,n} i_m - C_1 \int i_m dt \quad (۱۰-۲)$$

همچنین داریم:

$$\left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] = -w_{R1} - \left[ \underline{R_1}, \overline{R_1} \right] \cdot (-\xi_{ssf,im}) \quad (۱۱-۲)$$

جایی که  $w_{R1}$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$w_{R1} = - \left[ \delta_{R1,L}, \delta_{R1,u} \right] \cdot R_{1,n} \cdot i_m$$

$$\left[ \delta_{R1,L}, \delta_{R1,u} \right] = \left[ -\frac{\Delta R_L}{R_{1,n}}, \frac{\Delta R_u}{R_{1,n}} \right] \quad (۱۲-۲)$$

همچنین ترم دوم در معادله دوم از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\left[ \underline{R_1}, \overline{R_1} \right] = \left[ R_{1,n}, R_{1,n} \right] + \left[ -\Delta R_L, \Delta R_u \right] \quad (۱۳-۲)$$

$$\xi_{ssf,im} = - \left[ -\Delta s_{sf_{i_m,L}}, \Delta s_{sf_{i_m,u}} \right]$$

حال می توان اثبات کرد که در حالتی که خطا داخل سیستم وجود ندارد، داریم:

$$I_{r_{1,n}} \subseteq \left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] \quad (۱۴-۲)$$

و برای زمانی که خطا داخل سیستم وجود دارد، داریم:

$$I_{r_{1,n}} \not\subseteq \left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] \quad (۱۵-۲)$$

که اثبات آن در مقالات مورد نظر وجود دارد، [۱۶]. به بیان ساده تر در این روش به جای اینکه باقیمانده صفر به معنای عدم وجود خطا در سیستم باشد، به دلیل وجود عدم قطعیت در سیستم باید

باقیمانده بین دو حد بالا و پایین قرار گیرد تا مشخص شود که خطایی در سیستم وجود ندارد و در صورت بروز خطا، مقدار باقیمانده از محدوده مجاز حد بالا و پایین خارج می شود.

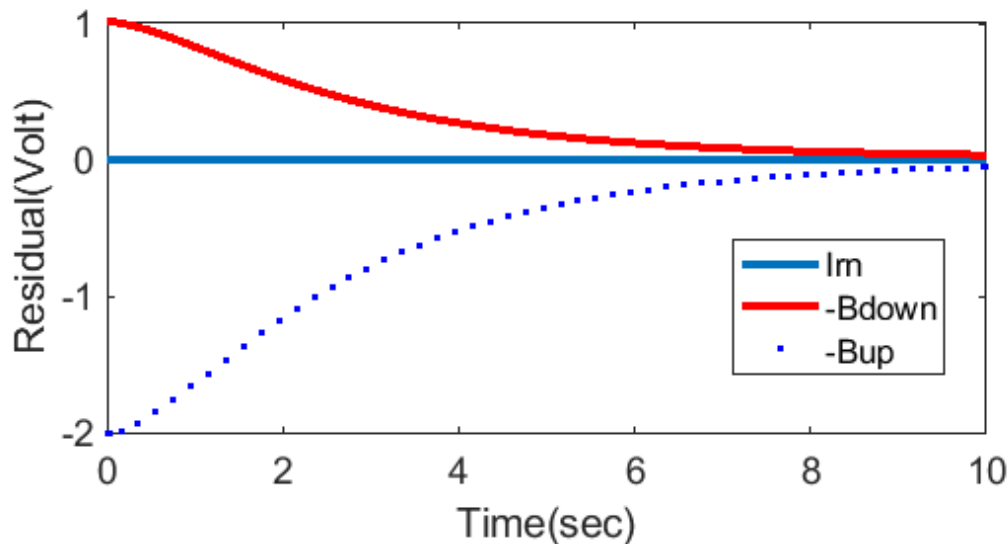
## ۲-۵-۲ شبیه سازی برای عدم قطعیت پارامتری

در این بخش به شبیه سازی مدار الکتریکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم پرداخته می شود. بدین منظور مدار الکتریکی در نرم افزار Matlab شبیه سازی می شود. حال پارامترهای سیستم مطابق زیر در نظر گرفته می شود.

$$R_{1,n}=2, L_1=1, C_1=1.5, u(t)=10 \text{ volt} \quad (۱۶-۲)$$

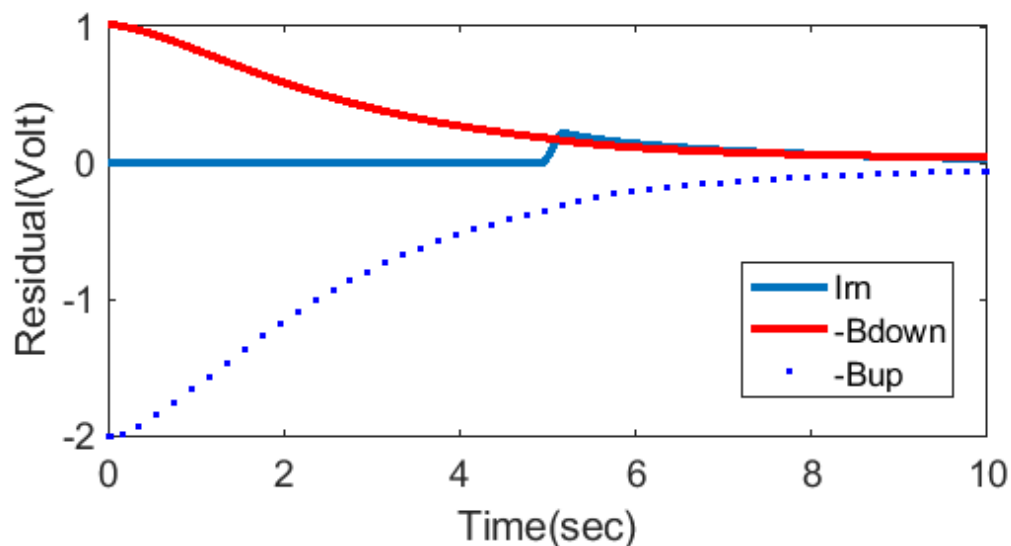
$$\Delta R_{1,u}=0.4, \Delta R_{1,L}=0.2, \Delta \text{ssf}_{i_m,l}=0.005, \Delta \text{ssf}_{i_m,u}=0.008$$

بعد از شبیه سازی سیستم، مقدار باقیمانده و حد بالا و پایین عدم قطعیت پارامترها بدون در نظر گرفتن خطا در سیستم در شکل (۱۹-۲) نشان داده شده است



شکل (۱۹-۲) باقیمانده و حد بالا و پایین برای سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت بدون در نظر گرفتن خطا

. علت کاهش مقدار دامنه حد بالا و پایین این است که ابتدا جریان زیاد بوده و با گذشت زمان جریان کاهش می یابد و چون طبق معادله (۲-۱۲) حد بالا و پایین تابع جریان می باشد بنابراین حالت کاهشی دارند. همانطور که از شکل (۲-۱۹) مشاهده می شود، مقدار نرمال باقیمانده در محدوده عدم قطعیت ها باقی می ماند در این حالت خطا در مقدار اندازه گیری جریان نیز وجود دارد. در نمودار فوق  $I_m$  مقدار خطا می باشد همچنین  $b_{down}$  و  $b_{up}$  حد مجاز خطا برای سیستم با عدم قطعیت می باشد. حال اگر مقدار مقاومت در ثانیه ۵ از مقدار مورد نظر ناگهانی تغییر کرده و به مقدار ۲,۳ برسد نمودار باقیمانده و عدم قطعیت های آن در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است.

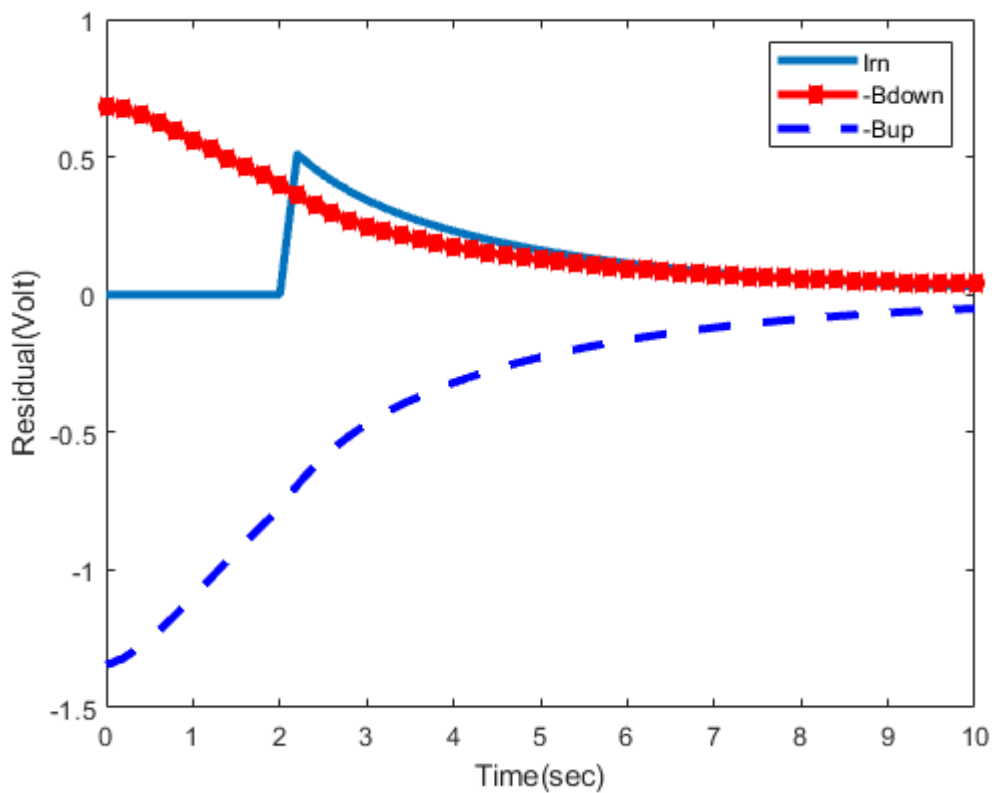


شکل (۲-۲۰) مقدار باقیمانده و حد بالا و پایین عدم قطعیت ها با در نظر گرفتن خطا در مقاومت الکتریکی

همانگونه که در شکل (۲-۲۰) مشاهده می گردد در هنگامی که خطایی در داخل سیستم ایجاد می شود، مقدار نرمال خطا از حد بالا و پایین عدم قطعیت بیشتر می گردد و نشان می دهد که خطا داخل سیستم وجود دارد و این خطا حتی با وجود عدم قطعیت در اندازه گیری مقادیر جریان نیز در سیستم وجود دارد. نتایج شبیه سازی برای حالتی که خطا از ثانیه ۲ شروع می شود در شکل (۲-۲۱)

نشان داده شده است بنابراین مشاهده می شود که در هر زمانی که خطا شروع می شود، سیستم قابلیت شناسایی را دارا می باشد.

شناسایی و جداسازی خطا برای یک سیستم RLC با وجود عدم قطعیت در مقاومت انجام گرفت با دانستن محدوده تغییر پارامترهای سیستم می توان با بدست آوردن باقیمانده ها به وجود خطا در سیستم پی برد.



شکل (۲-۲۱) مقدار باقیمانده و حد بالا و پایین عدم قطعیت ها با در نظر گرفتن خطا در مقاومت الکتریکی

## ۳-۵-۲ تحلیل مقادیر اندازه گیری شده از سنسورها برای یک مدار الکتریکی R-

### L-C

در این بخش برخلاف قسمت، فرض می شود که عدم قطعیت بر روی L و R و همچنین مقادیر اندازه گیری شده از سنسور اندازه گیری جریان و همچنین ولتاژ اندازه گیری شده از خازن لحاظ می گردد. به عنوان نمونه عدم قطعیتی بر روی مقدار  $L_1$  در نظر گرفته شود، با استفاده از جبر بازه ای داریم:

$$[L_{1,l}, L_{1,u}] = L_{1,n} (1 + [\delta_{1,l}, \delta_{1,u}]) \quad (17-2)$$

حال می توان مقدار باقیمانده را از رابطه زیر بدست آورد:

$$[\underline{I_r} \quad \overline{I_r}] = I_{r_n} + [B_1(t), \overline{B_1(t)}] \quad (18-2)$$

که در رابطه بالا با توجه به مدار الکتریکی مورد نظر داریم:

$$I_{r_{1,n}} = u(t) - L_1 \frac{d}{dt} \{i_m\} - R_{1,n} i_m - V_m \quad (19-2)$$

همچنین داریم:

$$[B_1(t), \overline{B_1(t)}] = -(w_{R1} + w_{L1}) - \left( [L_1, \overline{L_1}] \cdot \frac{d\xi_{ssf,im}}{dt} + [R_1, \overline{R_1}] \cdot ((-\xi_{ssf,im}) + (-\xi_{ssf,vm})) \right) \quad (20-2)$$

جایی که داریم:

$$w_{R1} = -[\delta_{R1,L}, \delta_{R1,u}] \cdot R_{1,n} \cdot i_m$$

$$[\delta_{R1,L}, \delta_{R1,u}] = \left[ -\frac{\Delta R_L}{R_{1,n}}, \frac{\Delta R_u}{R_{1,n}} \right]$$

$$[\underline{R_1}, \overline{R_1}] = [R_{1,n}, R_{1,n}] + [-\Delta R_L, \Delta R_u] \quad (21-2)$$

$$[\underline{L_1}, \overline{L_1}] = [L_{1,n}, L_{1,n}] + [-\Delta L_{1,L}, \Delta L_{1,u}]$$

$$\xi_{ssf,im} = -[-\Delta s_{sf} f_{i_m,1}, \Delta s_{sf} f_{i_m,u}]$$

$$\xi_{ssf,vm} = -[-\Delta s_{sf} f_{v_m,1}, \Delta s_{sf} f_{v_m,u}]$$

حال می توان اثبات کرد که در حالی که خطا داخل سیستم وجود ندارد، داریم:

$$I_{r_{1,n}} \subseteq \left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] \quad (22-2)$$

و برای زمانی که خطا داخل سیستم وجود دارد، داریم:

$$I_{r_{1,n}} \not\subseteq \left[ \underline{B_1(t)}, \overline{B_1(t)} \right] \quad (23-2)$$

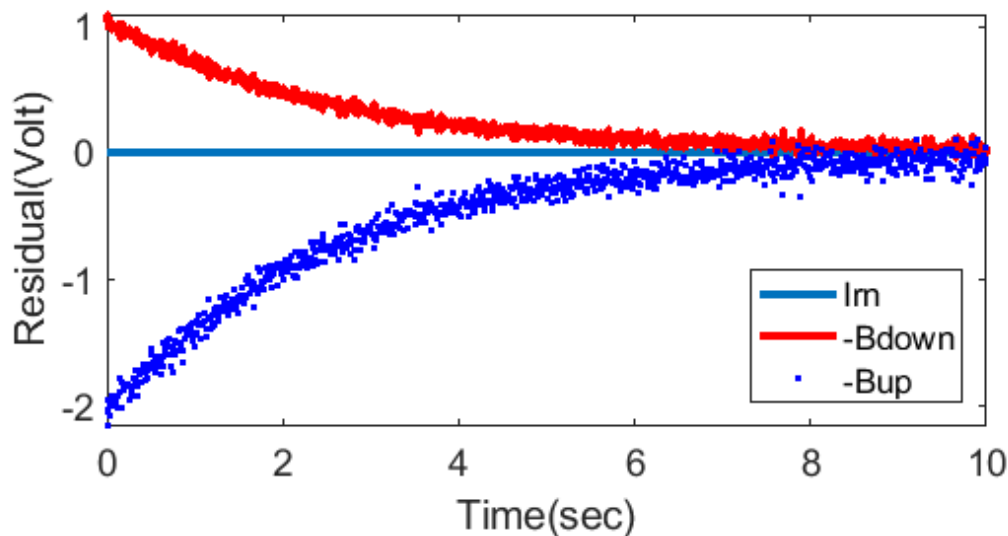
که اثبات آن در مقالات مورد نظر وجود دارد، [۱۶].

## ۲-۵-۴ شبیه سازی در حالت وجود خطا در سنسورها

حال با در نظر گرفتن پارامترهای زیر به شبیه سازی مدار الکتریکی مورد نظر پرداخته می شود:

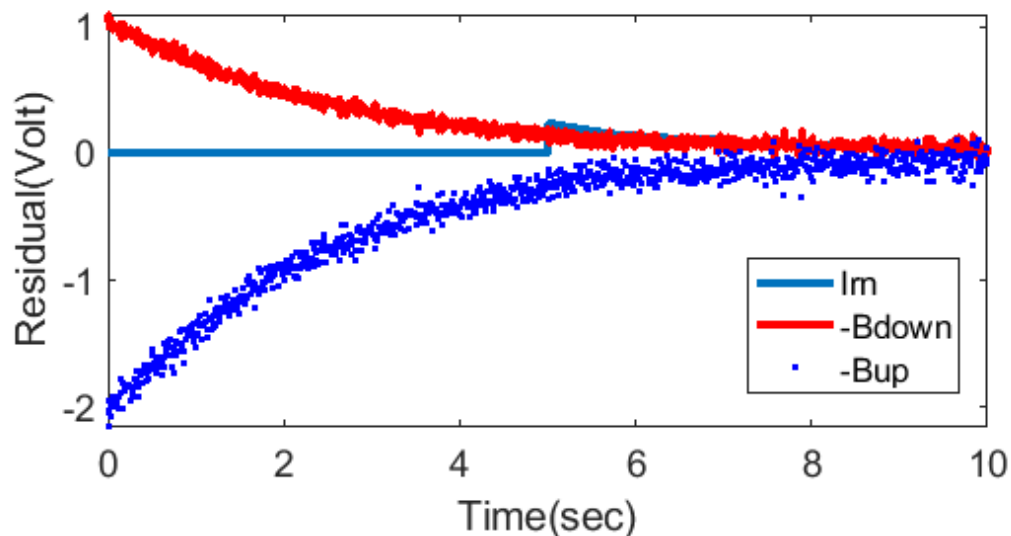
$$\begin{aligned} R_{1,n} &= 2, L_1 = 1, C_1 = 1.5, u(t) = 10 \text{ volt} \\ \Delta R_{1,u} &= 0.4, \Delta R_{1,L} = 0.2, \Delta L_{1,u} = 0.2, \Delta R_{1,L} = 0.1 \\ \Delta \text{ssf}_{i_m,1} &= 0.005, \Delta \text{ssf}_{i_m,u} = 0.008 \\ \Delta \text{ssf}_{v_m,1} &= 0.001, \Delta \text{ssf}_{v_m,u} = 0.002 \end{aligned} \quad (24-2)$$

مقدار باقیمانده و عدم قطعیت پارامترها در شکل (۲۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲۲-۲) مقدار باقیمانده و همچنین حد بالا و پایین عدم قطعیت ها بدون وجود خطا در سیستم

همانطور که از نمودار بالا مشاهده می شود، مقدار نرمال باقیمانده در محدوده عدم قطعیت ها باقی می ماند این موضوع بیانگر این است که هیچ خطایی با لحاظ نمودن عدم قطعیت در سیستم وجود ندارد. حال اگر مقدار مقاومت در ثانیه ۵ از مقدار مورد نظر ناگهانی تغییر کرده و به مقدار ۲,۳ برسد، نمودار باقیمانده و عدم قطعیت های آن در شکل (۲-۲۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲۳) باقیمانده مدار R-L-C و حد بالا و پایین عدم قطعیت با وجود خطا در مقاومت الکتریکی

همانگونه که در شکل (۲-۲۳) مشاهده می گردد در هنگامی که خطایی در داخل سیستم ایجاد می شود، مقدار نرمال خطا از حد بالا و پایین عدم قطعیت بیشتر می گردد و نشان می دهد که خطا داخل سیستم وجود دارد و عمل شناسایی و جداسازی خطا با وجود عدم قطعیت در سیستم انجام می پذیرد.

دو موضوع در استخراج روابط مربوط به باقیمانده ها مخصوصا قسمتی که مربوط به عدم قطعیت ها می باشد، دارای اهمیت است که باید بدان توجه گردد. این موضوع به دلیل نظر گرفتن عدم قطعیت برای سنسورها می باشد.

- وجود متغیرهای بازه ای چند رخدادی: وجود متغیرهای چند رخدادی در یک تابع بازه ای باعث تخمین بیش از حد محدود مربوط به عدم قطعیت ها می شود. این مسئله کلاسیک منجر به تخمین بیش از حد محدود بازه ای و نازک شدن محدوده مربوطه می گردد. باقیمانده هایی که از اتصال های مشاهده پذیر بدست می آیند، به عدم قطعیت های اندازه گیری حساس می باشند همانگونه که یک بازه عدم قطعیت مربوط به اندازه گیری چند بار در معادلات باقیمانده وارد می شوند به عنوان مثال در مدار RLC مقدار اندازه گیری جریان چند بار در مقدار باقیمانده وارد شده و هر باز نیز مقدار عدم قطعیت باید اعمال شود. این موضوع در مسایل پیچیده بسیار پر اهمیت تر می شود. بنابراین این ضرورت وجود دارد که یک منطق شناسایی خطا توسعه داد شود که در آن از عدم قطعیت های موجود در اندازه گیری در ارزیابی محدود رنج کلی عدم قطعیت ها استفاده نشود.

- تخمین مشتق های سیگنال: عبارت های باقیمانده در اغلب موارد به مشتق سیگنال اندازه گیری شده حساس هستند. این مشتق ها در نقاطی که باید مقدار نرمال باقی مانده و محدود مقداردهی شود ظاهر می شوند. به عنوان نمونه، تخمین محدود بازه ای برای مشتق سیگنال مقداردهی شده بازه ای، با استفاده از دیفرانسیل دو بازه متوالی انجام می پذیرد به عنوان نمونه، برای مثال قبل مقدار مشتق عبارت موجود در محدوده بازه ای از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\left[ \underline{L}_1 \quad \overline{L}_2 \right] \cdot \frac{d(\xi_{ssf,im})}{dt} = \left[ \underline{L}_1 \quad \overline{L}_2 \right] \cdot \frac{\left( \left[ -\Delta sse_{i_m,l}, \Delta sse_{i_m,u} \right]_{t_i} - \left[ -\Delta sse_{i_m,l}, \Delta sse_{i_m,u} \right]_{t_{i-1}} \right)}{t_i - t_{i-1}} \quad (25-2)$$

با:

$$\left[-\Delta sse_{i_m, j}, \Delta sse_{i_m, u}\right]_{t_i} - \left[-\Delta sse_{i_m, j}, \Delta sse_{i_m, u}\right]_{t_{i-1}} = \left[-\Delta sse_{i_m, j, t_i} - \Delta sse_{i_m, u, t_{i-1}}, \Delta sse_{i_m, u, t_i} + \Delta sse_{i_m, j, t_{i-1}}\right] \quad (26-2)$$

جایی که  $t_i$  اندیس زمان های منفصل می باشد. روش دیفرانسیل محدود بدترین روش تقریب می باشد. بنابراین روش های موثر برای تخمین بهینه مشتق بازه های اندازه گیری نیاز است. موضوعات ذکر شده در بالا به ترتیب با بهره گیری از FME و دیفرانسیل گر مود لغزشی حل خواهد شد.

روش حذف فوریه-ماتزکین:

برای رفع مشکلات ذکر شده در بالا، روش حذف فوریه-ماتزکین در منطق شناسایی خطا با وجود عدم قطعیت های اندازه گیری بهره برداری شده است. این روش جواب های نامعادله سیستم خطی

$A.x \leq B$  را جایی که  $A \in R^{m,n}, B \in R^m$  است را پیدا می کند. ابتدا تعاریف زیر را در نظر بگیرید:

$$I^+ = \{i : a_{i1} > 0\}, I^0 = \{i : a_{i1} = 0\}, I^- = \{i : a_{i1} < 0\}, a'_{ij} = a_{ij} / |a_{i1}| \quad (27-2)$$

$$b'_i = b_i / |a_{i1}|$$

یک سیستم غیر خطی  $A.x \leq B$  که به فرم زیر می توان نوشته شود:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n \leq b_n \end{cases} \quad (28-2)$$

هدف در حذف  $x_1$  از معادله بالا و قیاس باندهای بالایی و پایینی بر روی بازه خاصی از  $x_1$  با استفاده

از  $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  می باشد. برای هر ردیف  $i$  جایی که  $a_{i1} \neq 0$ ،  $i$ -ام نامعادله  $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$

در مقدار  $\frac{1}{|a_{i1}|}$  ضرب می شود. از این رو سیستم معادلات بالا به رابطه زیر منتج می شود:

$$\begin{cases} x_1 + a'_{i2}x_2 + \dots + a'_{in}x_n \leq b'_i & \text{for } i \in I^+ \\ a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i & \text{for } i \in I^0 \\ -x_1 + a'_{i2}x_2 + \dots + a'_{in}x_n \leq b'_i & \text{for } i \in I^- \end{cases} \quad (29-2)$$

این موضوع دست خواهیم یافت که  $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  جواب های نامعادله بالا خواهند بود اگر و تنها اگر  $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  رابطه زیر را برقرار کنند:

$$\sum_{j=2}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{for } i \in I^0 \quad (30-2)$$

$$\sum_{j=2}^n a'_{kj} x_j - b'_k \leq x_1 \leq a'_i - \sum_{j=2}^n a_{ij} x_j \quad \text{for } i \in I^+ \text{ and } k \in I^-$$

نسبت به نامعادله بالا این موضوع استنتاج می شود که  $x_1$  باید در رابطه زیر صدق کند:

$$(31-2)$$

$$\max_{k \in I^-} \left( \sum_{j=2}^n a'_{kj} x_j - b'_k \right) \leq x_1 \leq \min_{i \in I^+} \left( b'_i - \sum_{j=2}^n a_{ij} x_j \right)$$

روند های مشابه آنچه بالا انجام گرفت می توان به عنوان برای بدست آوردن محدوده های بالا و پایین  $x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  استفاده شود.

## ۶-۲ نتیجه گیری

ابتدا روش شناسایی و جداسازی خطا برای یک ربات دو لینکی استخراج گردید. برای نیل به این منظور مدل بانداگراف ربات استخراج گردید. سپس باقیمانده ها از روی این مدل بدست آمد و با توجه به قضایا موجود در مراجع باید یک باقیمانده منحصر به فرد برای هر خطا بدست آید که در صورت عدم وجود خطا این مقدار صفر بوده و هنگامی که خطا در سیستم ایجاد می شود مقدار آن تغییر می کند. از آنجا که عدم قطعیت در پارامترها و خروجی سنسورها وجود دارد، باید روشی برای شناسایی و جداسازی خطا با وجود عدم قطعیت در سیستم بدست آید. با استفاده از جبر بازه ای جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم، مقدار باقیمانده در حالت ایده آل و همچنین مقدار حد بالا و پایین با توجه به عدم قطعیت ها محاسبه گردید که برای شناسایی و جداسازی خطا، هنگامی که خطا وجود

ندارد، مقدار نرمال باید در محدوده بالا و پایین قرار گیرد و در صورت وجود خطا، مقدار نرمال از محدوده بالا و پایین خارج می شود. این روش بر روی مدار RLC هنگامی که عدم قطعیت پارامتری و همچنین عدم قطعیت پارامتری و اندازه گیری وجود دارد پیاده سازی گردید. حال در ادامه این روش برای یک سیستم عملگری ربات موازی کابلی پیاده سازی خواهد شد.

## **فصل ۳: تشخیص و جداسازی خطا برای**

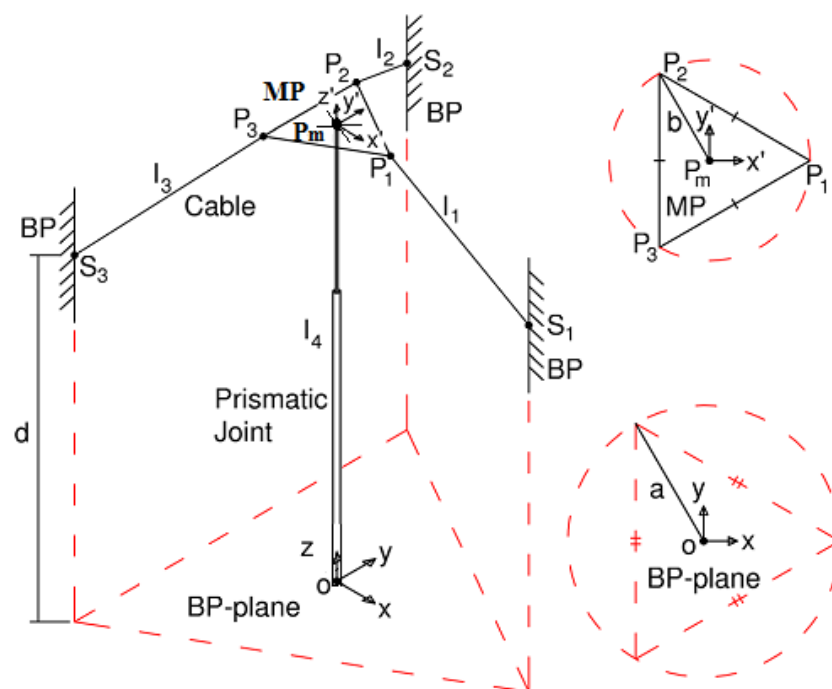
### **یک ربات موازی کابلی**

### ۱-۳ مقدمه

در این فصل شناسایی و جداسازی خطا برای یک ربات موازی کابلی مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا مدل سازی و استخراج معادلات دینامیکی برای ربات موازی کابلی مورد نظر انجام می پذیرد. سپس روش شناسایی و جداسازی خطا که در فصل قبل معرفی گردید بر روی آن پیاده سازی شده و با استخراج معادلات مربوطه، نتایج استخراج می شود.

### ۲-۳ مدل سازی ربات موازی کابلی

در این گزارش هدف استخراج معادلات دینامیکی و همچنین ترسیم مدل باندگراف و در نهایت تشخیص و جداسازی خطا برای یک ربات موازی کابلی می باشد. مدل در نظر گرفته شده در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) ربات موازی کابلی مورد مطالعه

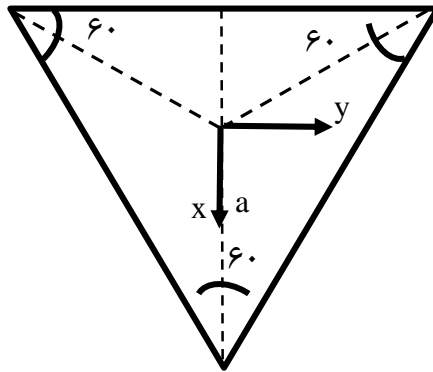
در این ربات از یک صفحه متحرک مثلثی که با سه کابل و یک جک پنوماتیکی حرکت می نماید، به عنوان مجری نهایی استفاده می شود. برای ایجاد کشش کابل از سه موتور الکتریکی استفاده می شود که در سه نقطه  $S_1, S_2, S_3$  قرار گرفته اند. صفحه متحرک  $P_1P_2P_3$  در سه گوشه خود از طریق کابل های  $S_1P_1$ ،  $S_2P_2$ ، و  $S_3P_3$  به موتورها وصل می شوند. همچنین یک جک نیوماتیکی برای حرکت عمودی صفحه متحرک بالایی استفاده شده است که از یک طرف به زمین متصل شده است و از طرف دیگر با استفاده از یک اتصال یونیورسال به صفحه بالایی متصل می شود. بنابراین صفحه بالایی دارای سه درجه آزادی می باشد که یک درجه آزادی حرکت انتقالی در راستای عمودی یعنی  $Z$  و دو درجه آزادی دوارنی می باشد. حرکت انتقالی صفحه از طریق جک پنوماتیک ایجاد می شود و حرکت دوارنی صفحه از طریق کشش کابل ها، که توسط موتورهای الکتریکی ایجاد می شوند، انجام می پذیرد.

### ۳-۳ استخراج مدل سینماتیکی

در این بخش هدف استخراج مدل سینماتیکی ربات می باشد. در استخراج مدل سینماتیکی در پی یافتن رابطه ای بین تغییرات طول کابل ها و موقعیت خطی جک نیوماتیکی با تغییرات موقعیت دوارنی و خطی صفحه بالایی می باشیم. در ادامه متغیرهای حرکت به صورت زیر تعریف می شود:

$$P = [Z \quad \alpha \quad \beta]^T \quad (1-3)$$

در رابطه بالا،  $Z$  موقعیت عمودی صفحه متحرک،  $\alpha$  موقعیت دوارنی صفحه حول محور  $X$  و  $\beta$  موقعیت دوارنی صفحه حول محور  $Y$  می باشد. با توجه با شکل زیر می توان موقعیت مطلق محل قرار گیری سه موتور را در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

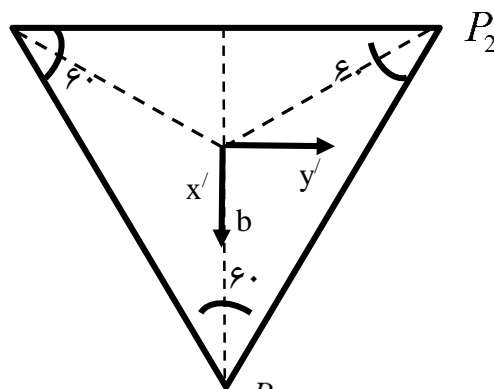


شکل (۲-۳) موقعیت قرار گیری سه موتور بر روی صفحه افقی

$$OS_1 = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ L_{f_1} \end{bmatrix}, OS_2 = \begin{bmatrix} -\frac{a}{2} \\ a \cos(30) \\ L_{f_2} \end{bmatrix}, OS_3 = \begin{bmatrix} -\frac{a}{2} \\ -a \cos(30) \\ L_{f_3} \end{bmatrix} \quad (۲-۳)$$

جایی که در رابطه بالا  $L_{f_1}$ ،  $L_{f_2}$  و  $L_{f_3}$  به ترتیب موقعیت عمودی نقاط  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  می باشد و  $a$  شعاع محیطی مثلثی متساوی الاضلاعی است که سه گوشه آن تصویر نقاط محل قرارگیری موتورهای الکتریکی بر روی صفحه  $XY$  می باشد. همچنین موقعیت گوشه های صفحه متحرک با توجه به شکل

(۳-۳) به صورت زیر محاسبه خواهد شد:



شکل (۳-۳) موقعیت گوشه های صفحه متحرک

$$P_1 = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} -b/2 \\ b \cos(30) \\ 0 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} -b/2 \\ -b \cos(30) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا  $b$  شعاع دایره محیطی است که از رئوس مثلث عبور می کند. همانگونه که توضیح داده شد صفحه متحرک دارای دو درجه آزادی دورانی یعنی  $\alpha$  و  $\beta$  می باشد برای مشخص شدن موقعیت دورانی از ماتریس دوران استفاده می شود. ماتریس دوران که موقعیت دورانی صفحه متحرک را مشخص می کند، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

حال اگر یک دستگاه مختصات XYZ بر روی صفحه متحرک متصل شود که حرکت دورانی انجام می دهد و یک دستگاه مختصات XYZ بر روی زمین نصب گردد می توان موقعیت مطلق گوشه های صفحه متحرک را از رابطه زیر به دست آورد:

$$P_{1,OXYZ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + RP_{1,oxyz}, P_{2,OXYZ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + RP_{2,oxyz}, P_{3,OXYZ} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + RP_{3,oxyz} \quad (5-3)$$

حال می توان میزان تغییر طول کابل برای حرکت صفحه را به صورت زیر به دست آورد:

$$P_i S_i = P_{i,OXYZ} - OS_i, \quad i=1, \dots, 3 \quad (6-3)$$

که در رابطه بالا  $P_i S_i$  طول کابل می باشد که بر حسب متغیرهای مسئله بیان شده است. اگر فرض شود که طول کابل داشته باشیم:

$$P_i S_i = \bar{L}_i \quad (7-3)$$

با جایگذاری (5-3) و (7-3) در رابطه (6-3) داریم:

$$L_1 = \left\| \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ L_{f_1} \end{bmatrix} \right\| \quad (۸-۳)$$

با ساده سازی عبارت بالا خواهیم داشت:

$$L_1 = \left\| \begin{bmatrix} b\cos(\beta) - a \\ 0 \\ Z_t - b\sin(\beta) - L_{f_1} \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{(b\cos(\beta) - a)^2 + (Z_t - b\sin(\beta) - L_{f_1})^2} \quad (۹-۳)$$

برای کابل دوم نیز مطابق بالا عمل می شود:

$$L_2 = \left\| \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b/2 \\ b\cos(30) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{a}{2} \\ a\cos(30) \\ L_{f_2} \end{bmatrix} \right\| \quad (۱۰-۳)$$

با ساده سازی رابطه فوق داریم:

$$L_2 = \left\| \begin{bmatrix} -b/2\cos(\beta) + b\cos(30)\sin(\alpha)\sin(\beta) + \frac{a}{2} \\ b\cos(30)\cos(\alpha) - a\cos(30) \\ Z_t + b/2\sin(\beta) + b\cos(30)\sin(\alpha)\cos(\beta) - L_{f_2} \end{bmatrix} \right\| \quad (۱۱-۳)$$

$$= \sqrt{\left(-\frac{b}{2}\cos(\beta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\alpha)\sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b\sqrt{3}}{2}\cos(\alpha) - \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(Z_t + \frac{b}{2}\sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2}\sin(\alpha)\cos(\beta) - L_{f_2}\right)^2}$$

برای کابل سوم نیز داریم:

$$L_3 = \left\| \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b/2 \\ -b\cos(30) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{a}{2} \\ -a\cos(30) \\ L_{f_3} \end{bmatrix} \right\| \quad (۱۲-۳)$$

با ساده سازی رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\dot{L}_2 = \frac{C_{L_2,\beta} \dot{\beta} + C_{L_2,\alpha} \dot{\alpha} + C_{L_2,z} \dot{Z}_t}{C_{L_2,N}}$$

$$C_{L_2,\beta} = 2 \left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right) \left( \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) \right) +$$

$$2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_2} \right) \left( \frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) \right)$$

$$C_{L_2,\alpha} = 2 \left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right) \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \sin(\beta) \right) +$$

$$2 \left( \frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) - \frac{a\sqrt{3}}{2} \right) \left( -\frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) + 2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_2} \right) \left( \frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \cos(\beta) \right)$$

$$C_{L_2,z} = 2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_2} \right)$$

$$C_{L_2,N} = 2 \sqrt{\left( \frac{b\dot{\beta} + C_{L_2,\alpha} \dot{\alpha} + C_{L_2,z} \dot{Z}_t}{C_{L_2,N}} + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( \frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) - \frac{a\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_2} \right)^2}$$

$$C_{L_1,\beta} = 2(b \cos(\beta) - a)(-b \sin(\beta)) + 2(Z_t - b \sin(\beta) - L_{f_1})(-b \cos(\beta))$$

$$C_{L_1,\alpha} = 0 \tag{۱۴-۳}$$

$$C_{L_1,z} = 2(Z_t - b \sin(\beta) - L_{f_1})$$

$$C_{L_1,N} = 2\sqrt{(b \cos(\beta) - a)^2 + (Z_t - b \sin(\beta) - L_{f_1})^2}$$

$$L_3 = \left[ \begin{array}{c} -b/2 \cos(\beta) - b \cos(30) \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \\ -b \cos(30) \cos(\alpha) + a \cos(30) \\ Z_t + b/2 \sin(\beta) - b \cos(30) \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_3} \end{array} \right] = \tag{۱۳-۳}$$

$$\sqrt{\left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( -\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) + \frac{a\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_3} \right)^2}$$

حال برای محاسبه روابط سرعت و محاسبه ژاکوبین باید از روابط (۹-۳)، (۱۱-۳) و (۱۳-۳) مشتق گرفته شود:

برای کابل دوم نیز داریم:

(۱۵-۳)

برای طناب سوم داریم

با بازنویسی معادلات فوق به صورت ژاکوبین داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{L}} &= \mathbf{J}\dot{\mathbf{P}} \\ \dot{\mathbf{L}} &= [\dot{L}_1 \quad \dot{L}_2 \quad \dot{L}_3]^T \\ \dot{\mathbf{P}} &= [\dot{z} \quad \dot{\alpha} \quad \dot{\beta}]^T \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} \frac{C_{L_{1,z}}}{C_{L_{1,N}}} & \frac{C_{L_{1,\alpha}}}{C_{L_{1,N}}} & \frac{C_{L_{1,\beta}}}{C_{L_{1,N}}} \\ \frac{C_{L_{2,z}}}{C_{L_{2,N}}} & \frac{C_{L_{2,\alpha}}}{C_{L_{2,N}}} & \frac{C_{L_{2,\beta}}}{C_{L_{2,N}}} \\ \frac{C_{L_{3,z}}}{C_{L_{3,N}}} & \frac{C_{L_{3,\alpha}}}{C_{L_{3,N}}} & \frac{C_{L_{3,\beta}}}{C_{L_{3,N}}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17-3)$$

$$\begin{aligned} \dot{L}_3 &= \frac{C_{L_{3,\beta}}\dot{\beta} + C_{L_{3,\alpha}}\dot{\alpha} + C_{L_{3,z}}\dot{z}}{C_{L_{3,N}}} \\ C_{L_{3,\beta}} &= 2 \left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right) \left( \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) \right) + \\ & 2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_2} \right) \left( \frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) \right) \\ C_{L_{3,\alpha}} &= 2 \left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right) \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{\alpha} \cos(\alpha) \sin(\beta) \right) + \\ & 2 \left( -\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) + \frac{a\sqrt{3}}{2} \right) \left( \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) + 2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_3} \right) \left( -\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \cos(\beta) \right) \\ C_{L_{3,z}} &= 2 \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_3} \right) \\ C_{L_{3,N}} &= \sqrt{\left( -\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( -\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) + \frac{a\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left( Z_t + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f_3} \right)^2} \end{aligned} \quad (16-3)$$

### ۴-۳ شبیه سازی

برای درک بهتر معادلات بالا، چند مسیر برای صفحه متحرک تعریف می شود و طول کابل ها محاسبه می شود. در ابتدا فرض می شود که مسیر حرکت صفحه به صورت زیر باشد:

$$\alpha = \frac{\pi}{3} \sin\left(\frac{\pi}{20}t\right)$$

$$\beta = \frac{\pi}{4} \sin\left(\frac{\pi}{20}t\right) \quad (۱۸-۳)$$

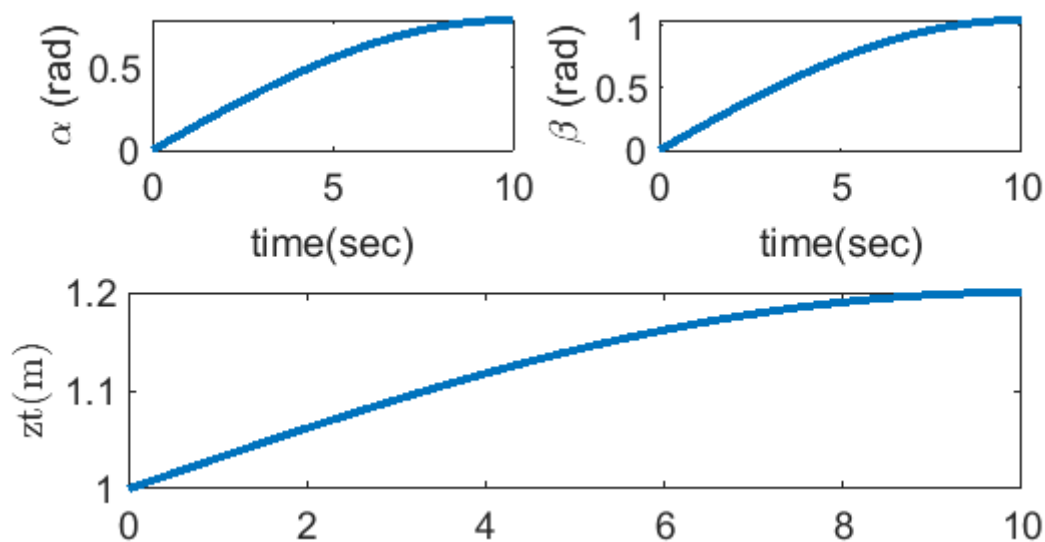
$$Z_t = 0.2 \sin\left(\frac{\pi}{20}t\right) + 1$$

همچنین پارامترهای هندسی مسئله به صورت زیر تعریف می شود:

$$L_{f_1} = 0.9\text{m}, L_{f_2} = 0.8\text{m}, L_{f_3} = 0.7\text{m} \quad (۱۹-۳)$$

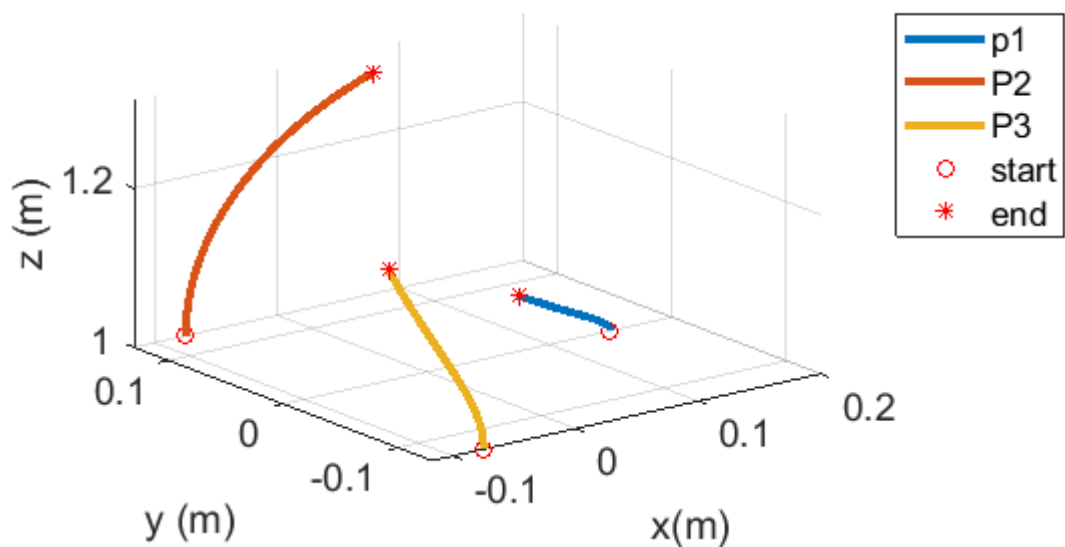
$$b = 0.15\text{m}, a = 0.6\text{m}$$

حال نمودار مسیر طی شده در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



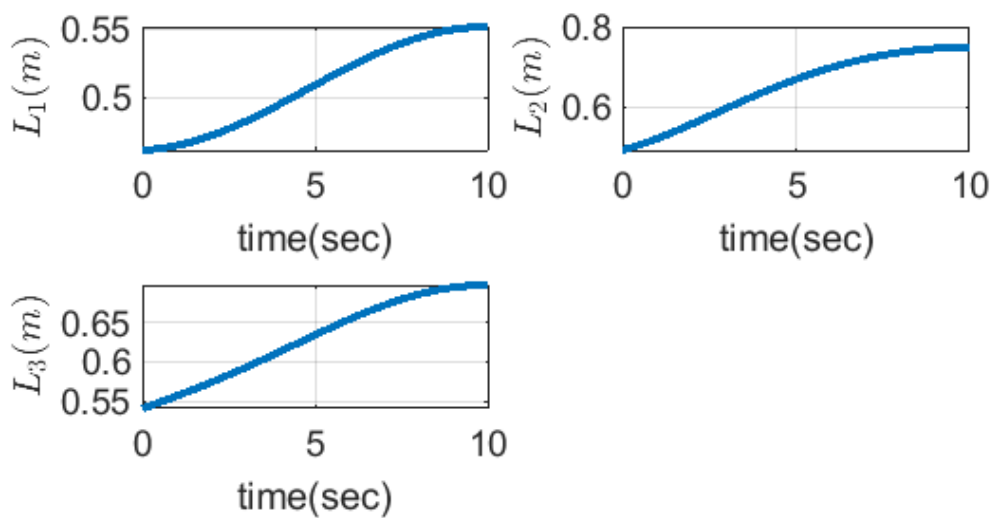
شکل (۴-۳) مسیر در نظر گرفته شده برای ربات

مقدار جابجایی سه گوشه صفحه متحرک در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



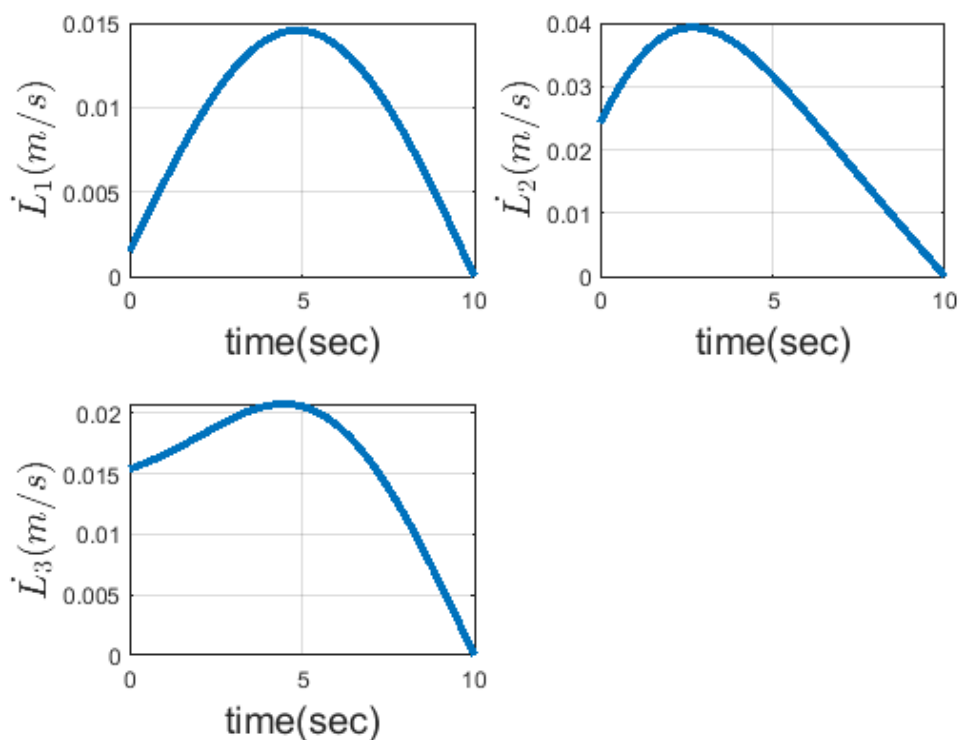
شکل (۳-۵) مسیر طی شده گوشه های صفحه متحرک

همچنین طول کابل ها به صورت برای پیمودن مسیر مطابق شکل (۳-۶) تغییر می کند.



شکل (۳-۶) تغییر طول هر یک از کابل ها

همچنین نمودار سرعت هر یک از کابل ها در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.



شکل (۷-۳) سرعت خطی کابل ها

### ۵-۳ استخراج مدل دینامیکی ربات

استخراج رابطه ای بین نیروهای کششی وارد بر صفحه متحرک و همچنین متغیرهای سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا از این طریق می‌توان نیروهای مورد نیاز برای حرکت مطلوب صفحه را به دست آورد. جهت استخراج معادلات دینامیکی از روش نیوتن و اویلر استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت مسئله، مرکز جرم صفحه متحرک تنها قابلیت حرکت در راستای Z را دارد و بنابراین شتاب مرکز جرم در راستای X و Y صفر می‌باشد. بنابراین معادلات نیوتن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (۲۰-۳)$$

$$T_1 \vec{e}_{T_1} + T_2 \vec{e}_{T_2} + T_3 \vec{e}_{T_3} + m\vec{g} + F_d \hat{k} + \vec{F}_c = m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{z} \end{bmatrix}$$

در رابطه فوق داریم:

$T_i$ : نیروی کششی کابل  $i$ -ام

$\vec{e}_{T_i}$  بردار یکه نشان دهنده راستای نیروی  $T_i$

$F_d$ : نیروی عملگری جک

$\vec{F}_c$ : نیروی تکیه گاهی بین جک و صفحه متحرک

بردار یکه  $\vec{e}_{T_i}$  که راستای اعمال نیرو را نشان می دهد، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\vec{e}_{T_i} = \frac{OS_i - PC_i}{\|OS_i - PC_i\|} \quad (۲۱-۳)$$

همچنین با توجه به مقید بودن صفحه متحرک در راستاهای X و Y نیروی قیدی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{F}_c = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} \quad (۲۲-۳)$$

معادلات دیگری که برای چنین سیستمی باید بکار گرفته شود، معادلات اوپلر می باشد که در مورد حرکت دورانی این صفحه متحرک صلب باید بازنویسی شود. این معادله اوپلر به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\sum \vec{M}_G = I\vec{\omega}_G + \vec{\omega} \times I\vec{\omega}_G \quad (۲۳-۳)$$

تنها نیروهایی که سبب دوران صفحه می شود، نیروهای کششی کابل های می باشد. همچنین باید شتاب زاویه ای صفحه نیز محاسبه شود. اگر ماتریس دوران به صورت زیر نوشته شود:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

حال می توان سرعت زاویه ای مطلق را به صورت زیر بدست آورد، [7]:

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \dot{r}_{31}r_{21} + \dot{r}_{32}r_{22} + \dot{r}_{33}r_{23} \\ \Omega_y &= \dot{r}_{11}r_{31} + \dot{r}_{12}r_{32} + \dot{r}_{13}r_{33} \\ \Omega_z &= \dot{r}_{21}r_{11} + \dot{r}_{22}r_{12} + \dot{r}_{23}r_{13} \end{aligned} \quad (25-3)$$

حال با توجه به ماتریس دوران برای صفحه متحرک می توان سرعت زاویه ای مطلق صفحه را بدست آورد:

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \cos(\beta)\dot{\alpha} \\ \Omega_y &= \dot{\beta} \\ \Omega_z &= -\sin(\beta)\dot{\alpha} \end{aligned} \quad (26-3)$$

حال با مشتق گیری از رابطه بالا می توان شتاب زاویه مطلق را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}_x &= -\sin(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} + \cos(\beta)\ddot{\alpha} \\ \dot{\Omega}_y &= \ddot{\beta} \\ \dot{\Omega}_z &= -\cos(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} - \sin(\beta)\ddot{\alpha} \end{aligned} \quad (27-3)$$

حال باید شتاب زاویه ای را در دستگاه XYZ بدست آورد که به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\vec{\alpha} = R\dot{\Omega} = \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \cos(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

حال با محاسبه شتاب زاویه ای صفحه متحرک می توان معادله اوپلر را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$r_1 \times T_1 + r_2 \times T_2 + r_3 \times T_3 + M_z k = I \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \cos(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$I = \begin{bmatrix} \frac{1}{8}mb^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}mb^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5}{8}mb^2 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

با ترکیب معادلات نیوتن و اوایلر داریم:

$$NX = M$$

$$X = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad F_d \quad F_{c,x} \quad F_{c,y} \quad M_z]^T \quad (3-30)$$

با معلوم بودن مسیرهای حرکت صفحه متحرک  $\alpha(t), \beta(t), Z(t)$  می توان با معادلات دینامیکی نیروهای مورد نیاز را از معادلات نیوتن و اوایلر بدست آورد. با ساده سازی معادلات و حفظ پارامترهای قیدی می توان به معادلات زیر دست پیدا نمود:

$$T_{1,z} + T_{2,z} + T_{3,z} + mg + F_d = m\ddot{z}$$

$$(r_1 \times T_1 + r_2 \times T_2 + r_3 \times T_3)_x = \frac{mR^2}{8} \ddot{\alpha} \quad (3-31)$$

$$(r_1 \times T_1 + r_2 \times T_2 + r_3 \times T_3)_y = \frac{mR^2}{2} (\cos(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin(\alpha))$$

قابل ذکر است که معادلات بالا ۳ معادله را نتیجه می دهد ولی تعداد مجهولات مسیله نیروهای کشش کابل که سه عدد است و نیروی عملگری جک که در مجموع تعداد مجهولات ۴ می باشد بنابراین تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر می باشد هنگامی که تعداد مجهولات از معادلات بیشتر است معادله دارای بیشمار جواب می باشد برای انتخاب جواب مناسب برای حل چنین مسیله ای یک الگوریتم بهینه سازی تعریف گردید. بدین منظور تابع هزینه به صورت زیر تعریف گردید:

$$I = T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 \quad (3-32)$$

به عبارت دیگر مجموع مربع نیروهای کشش کابل های به عنوان تابع هزینه انتخاب گردید و این تابع کمینه می شود به شرطی که معادله (۳-۳۱) برقرار باشد. بنابراین داریم:

Min I

0 شرح  $T, T, T$  و  $N=X_2 M_3$

(۳۳-۳)

فرض کنیم که ربات چنین مسیری را طی کند:

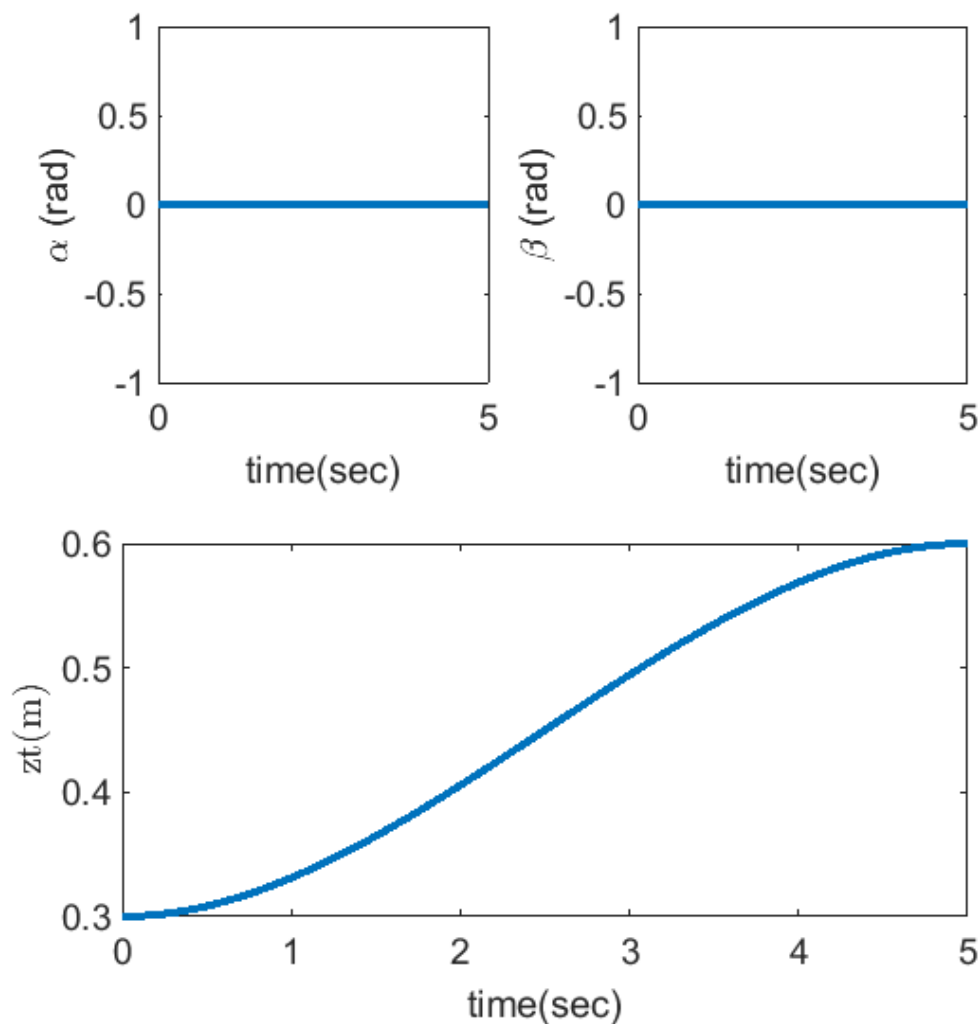
$$\alpha = a_{3,\alpha}t^3 + a_{2,\alpha}t^2 + a_{1,\alpha}t + a_{0,\alpha}, \quad \alpha(0) = 0, \alpha(t_f) = 0, \dot{\alpha}(0) = 0, \dot{\alpha}(t_f) = 0$$

$$\beta = a_{3,\beta}t^3 + a_{2,\beta}t^2 + a_{1,\beta}t + a_{0,\beta}, \quad \beta(0) = 0, \beta(t_f) = 0, \dot{\beta}(0) = 0, \dot{\beta}(t_f) = 0 \quad (۳۴-۳)$$

$$Z_t = a_{3,z_t}t^3 + a_{2,z_t}t^2 + a_{1,z_t}t + a_{0,z_t}, \quad Z_t(0) = 0.3, Z_t(t_f) = 0.6, \dot{Z}_t(0) = 0, \dot{Z}_t(t_f) = 0$$

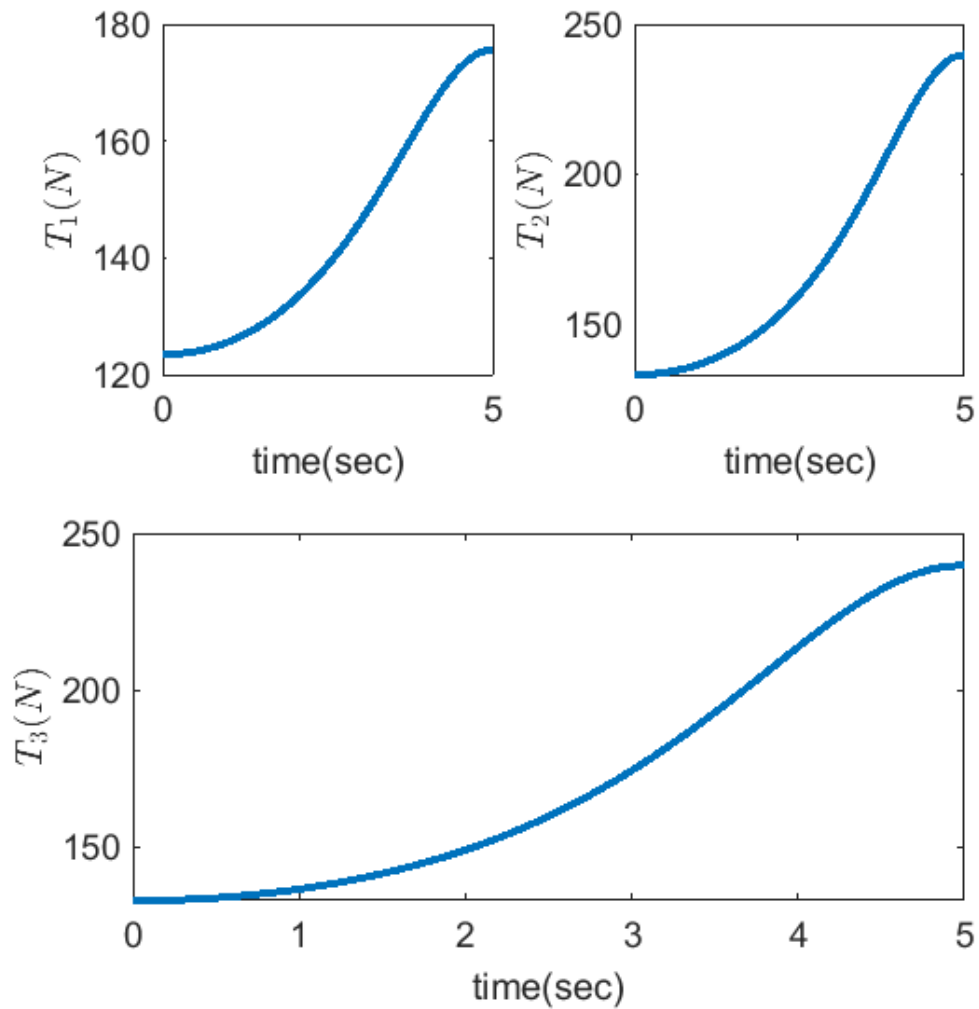
مشخصات هندسی ربات نیز مطابق معادله (۳-۱۹) در نظر گرفته می شود. مسیر حرکت صفحه

متحرک در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.



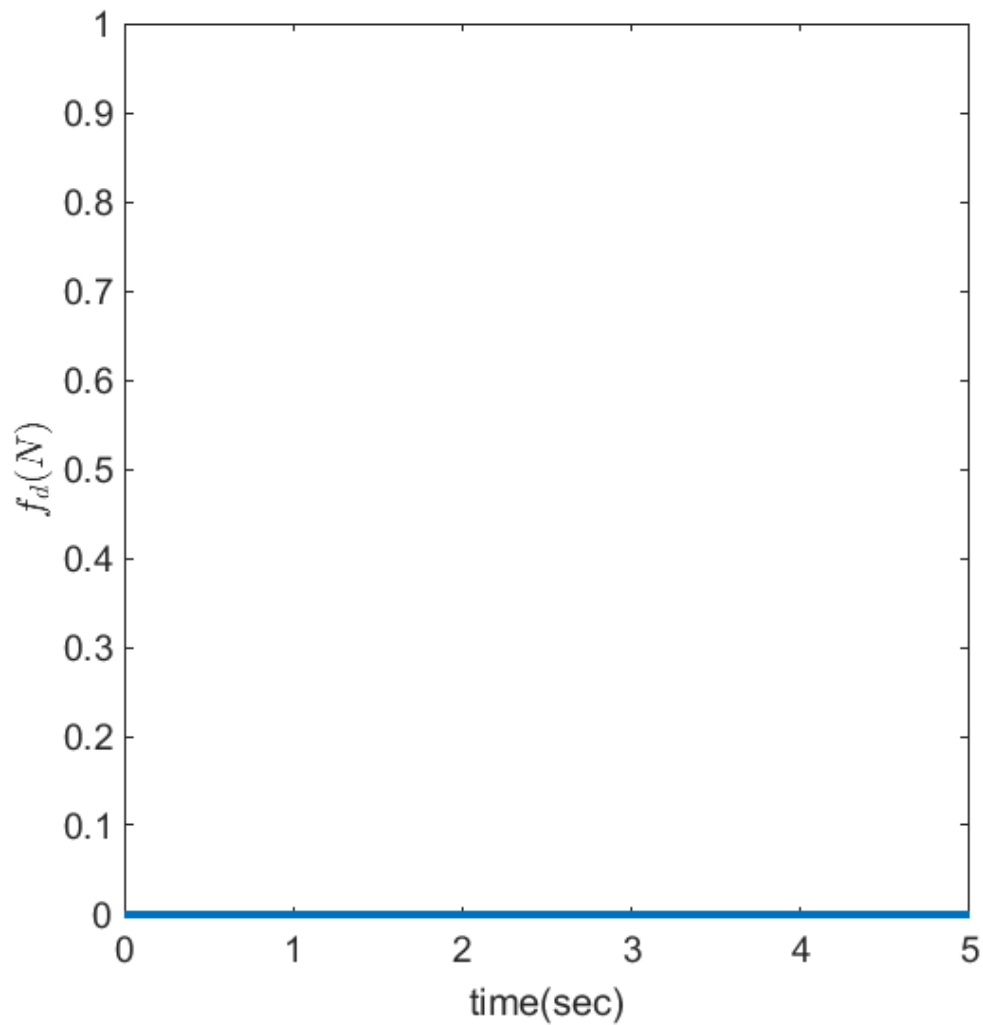
شکل (۳-۸) مسیر حرکت صفحه متحرک

حال نیروی کششی هر کابل در شکل (۹-۳) نشان داده شده است.



شکل (۹-۳) نیروی کششی کابل ها

همچنین نیروی عملگری که تابع هزینه مسیله بوده و کمترین مقدار شده است مطابق شکل (۱۰-۳) می باشد.

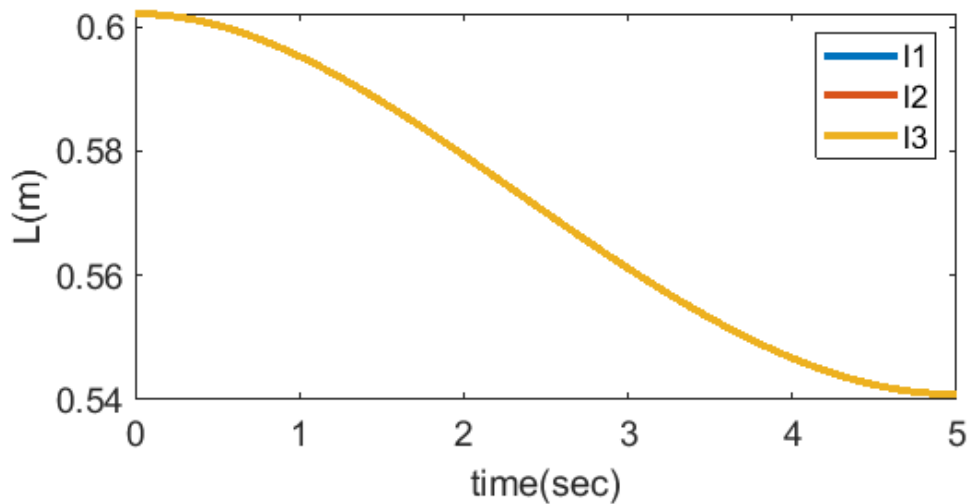


شکل (۳-۱۰) نیروی عملگری جک

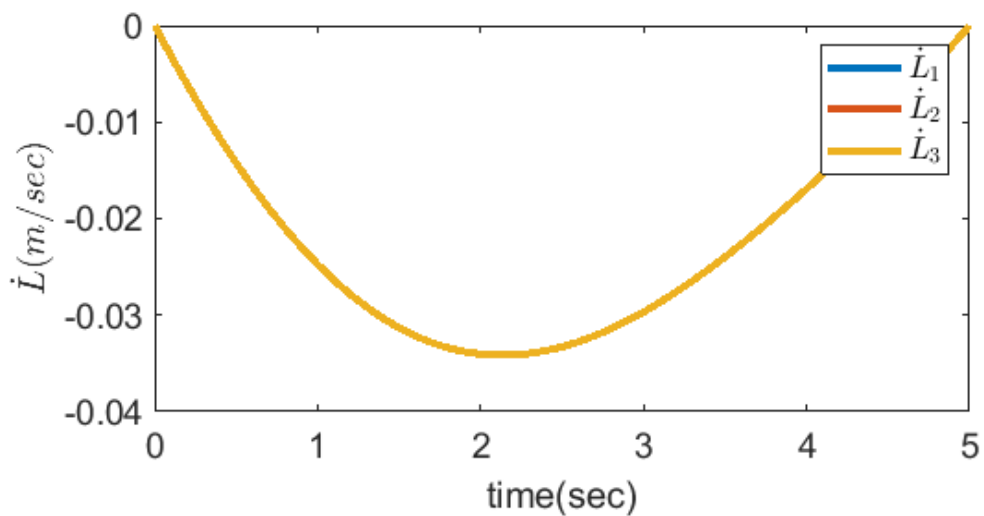
در این حالت مسیله به گونه ای حل شده است که حرکت تنها با نیروی کابل ها صورت پذیرد. برای انجام شبیه سازی و همچنین تصدیق معادلات استخراج شده، فرض می شود که صفحه متحرک فقط در راستای  $Z$  با نیروی ثابت 50 نیوتن حرکت کند مطابق زیر حرکت کند:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= a_{3,\alpha}t^3 + a_{2,\alpha}t^2 + a_{1,\alpha}t + a_{0,\alpha}, \quad \alpha(0) = 0, \alpha(t_f) = 0, \dot{\alpha}(0) = 0, \dot{\alpha}(t_f) = 0 \\
 \beta &= a_{3,\beta}t^3 + a_{2,\beta}t^2 + a_{1,\beta}t + a_{0,\beta}, \quad \beta(0) = 0, \beta(t_f) = 0, \dot{\beta}(0) = 0, \dot{\beta}(t_f) = 0 \\
 Z_t &= a_{3,Z_t}t^3 + a_{2,Z_t}t^2 + a_{1,Z_t}t + a_{0,Z_t}, \quad Z_t(0) = 0.5, Z_t(t_f) = 0.7, \dot{Z}_t(0) = 0, \dot{Z}_t(t_f) = 0
 \end{aligned} \tag{۳-۳۵}$$

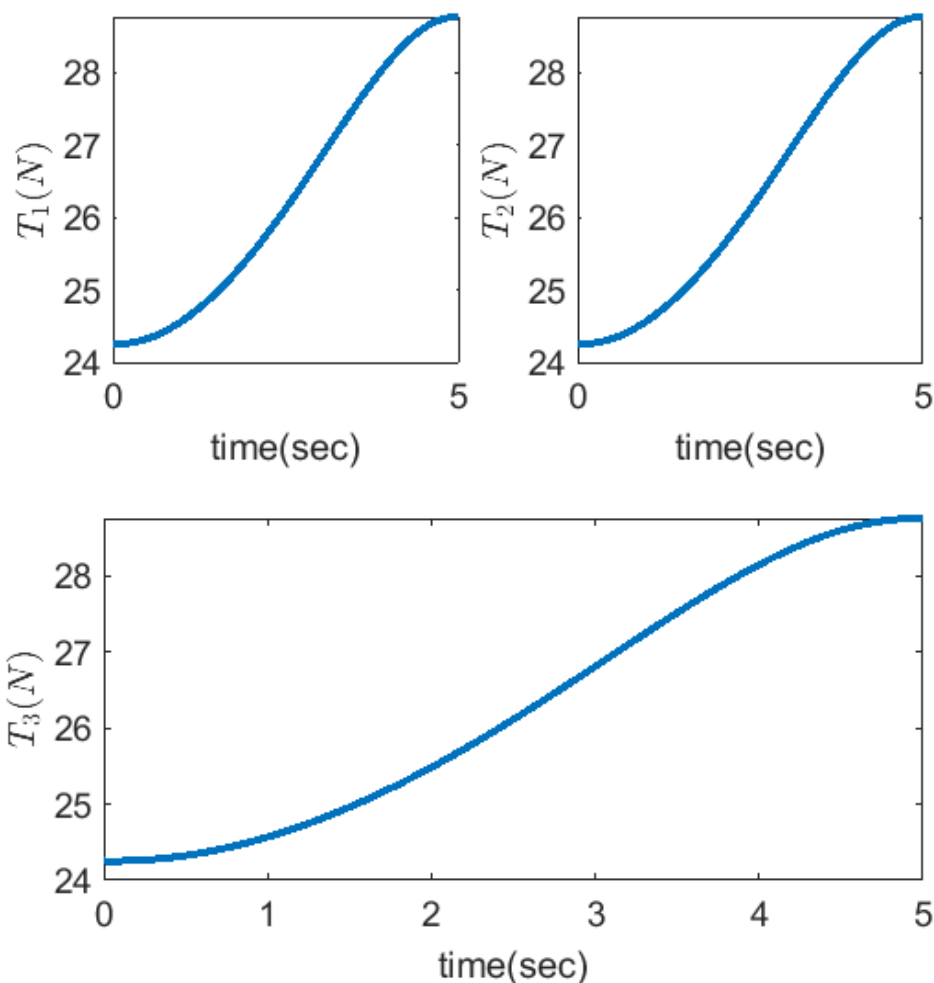
در این حالت تغییر طول کابل ها در شکل (۱۱-۳) ، سرعت خطی کابل ها در شکل (۱۲-۳) و همچنین نیروی کششی هر کابل در شکل (۱۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۳) تغییر طول کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر



شکل (۱۲-۳) سرعت خطی کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر



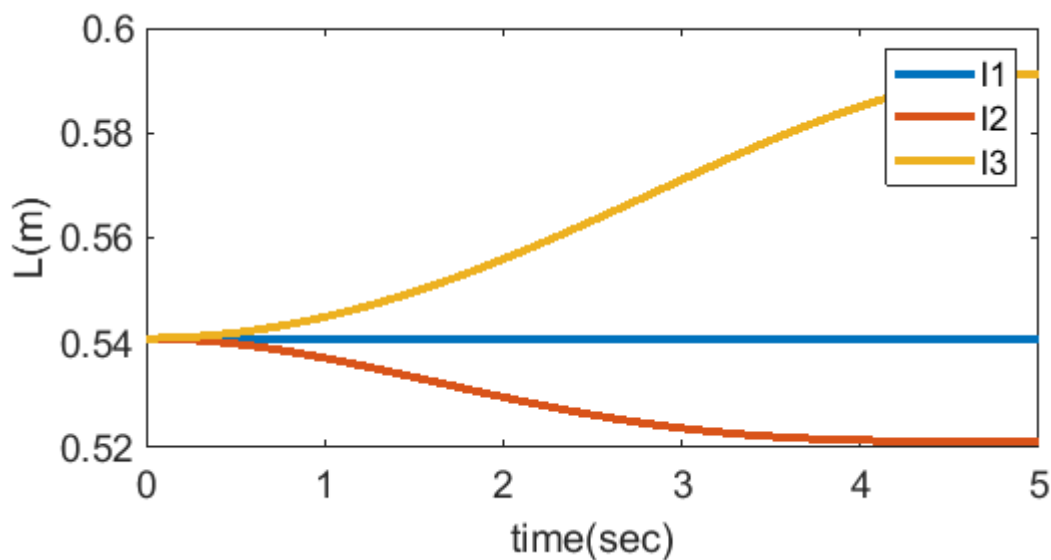
شکل (۳-۱۳) نیروی کششی در هر کابل

همانطور که از نمودارها مشخص است هنگامی که صفحه تنها در راستای Z حرکت می کند، و نیروی جک به میزان ۵۰ نیوتن وارد شود، نیروی تمامی جک ها ثابت بوده و همچنین تغییرات طول کابل هم برای همه یکسان بوده و سرعت خطی کابل ها نیز یکسان می باشد. در شبیه سازی دیگر تنها حرکت دورانی در نظر گرفته شده و فرض می شود که ارتفاع صفحه ثابت است تنها صفحه حول محور X دوران کند. بنابراین مسیر حرکت به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

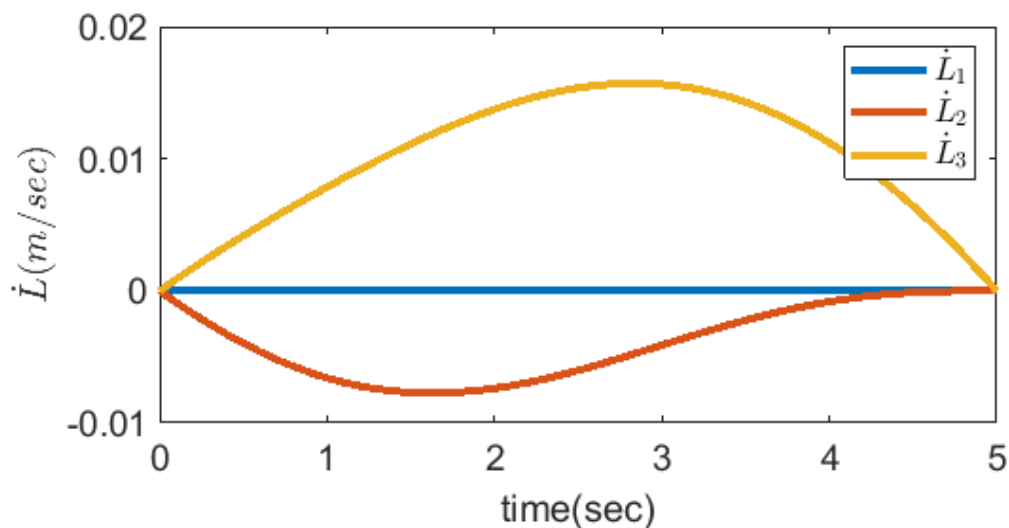
$$\alpha = a_{3,\alpha}t^3 + a_{2,\alpha}t^2 + a_{1,\alpha}t + a_{0,\alpha}, \quad \alpha(0) = 0, \alpha(t_f) = \frac{\pi}{6}, \dot{\alpha}(0) = 0, \dot{\alpha}(t_f) = 0 \quad (3-36)$$

$$\beta = 0, Z_t = 0.6m$$

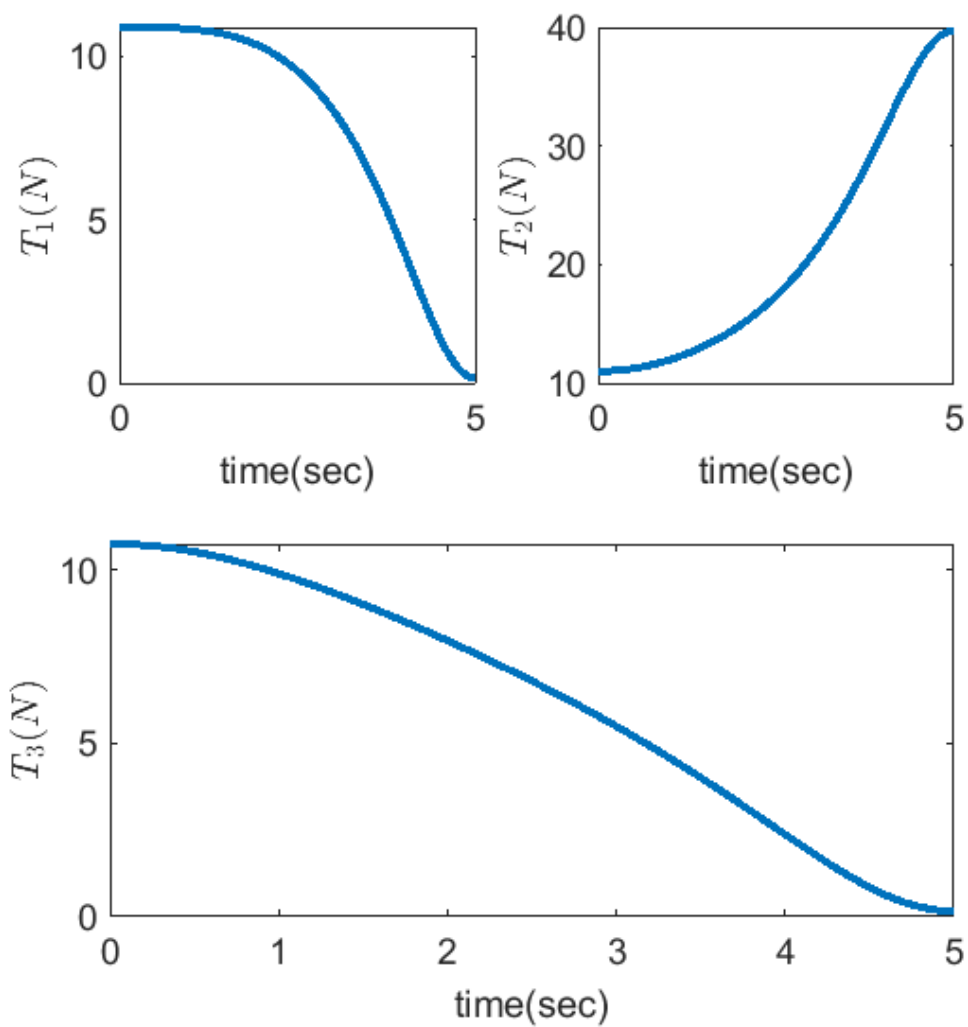
با در نظر گرفتن نیروی ثابت 70 نیوتن برای جک، مقدار تغییر طول کابل ها در شکل (۳-۱۴)، سرعت کابل ها در شکل (۳-۱۵) و نیروی کششی هر کابل در شکل (۳-۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۴) طول کابل ها برای طی مسیر مورد نظر



شکل (۳-۱۵) سرعت خطی کابل ها جهت طی مسیر مورد نظر



شکل (۳-۱۶) نیروی کششی هر کابل جهت طی مسیر مورد نظر

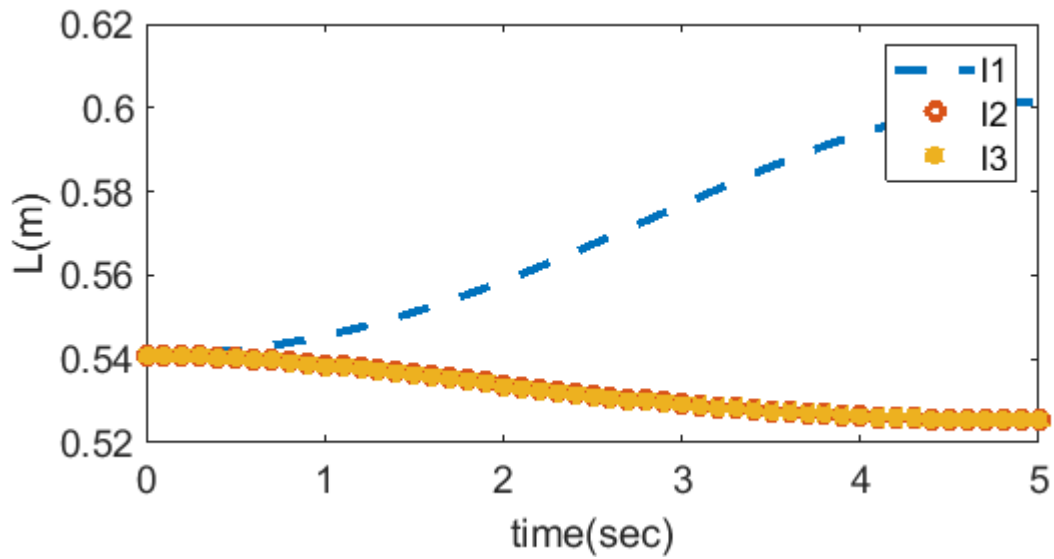
همچنین در ادامه فرض می شود که ارتفاع ثابت مانده و صفحه فقط در راستای  $y$  دوران نماید در این

حالت مسیر حرکت به صورت زیر خواهد بود:

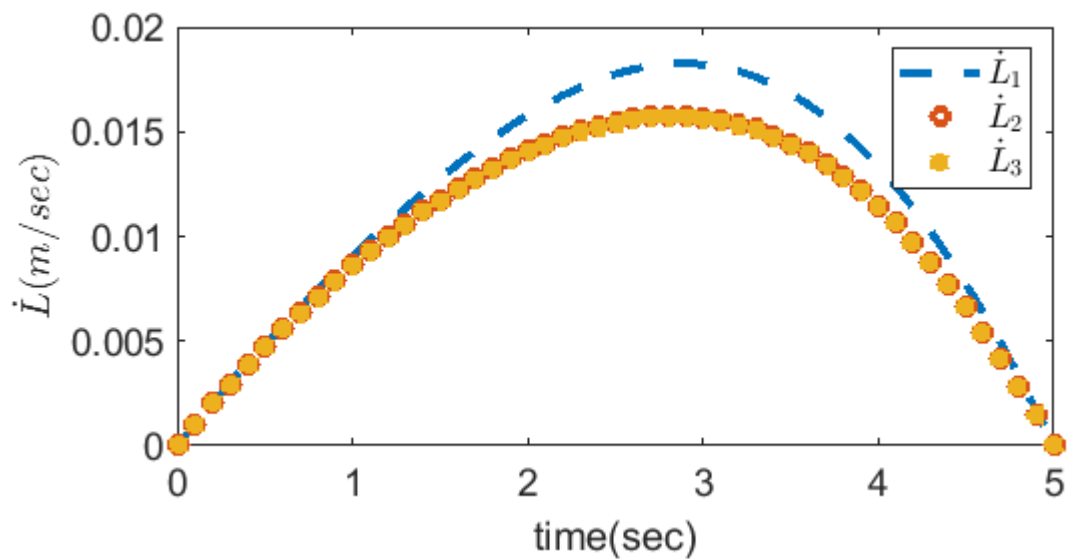
$$\alpha = 0, \beta = a_{3,\beta}t^3 + a_{2,\beta}t^2 + a_{1,\beta}t + a_{0,\beta}, \beta(0) = 0, \beta(t_f) = \frac{\pi}{6}, \dot{\beta}(0) = 0, \dot{\beta}(t_f) = 0 \quad (3-37)$$

$$Z_t = 0.6m$$

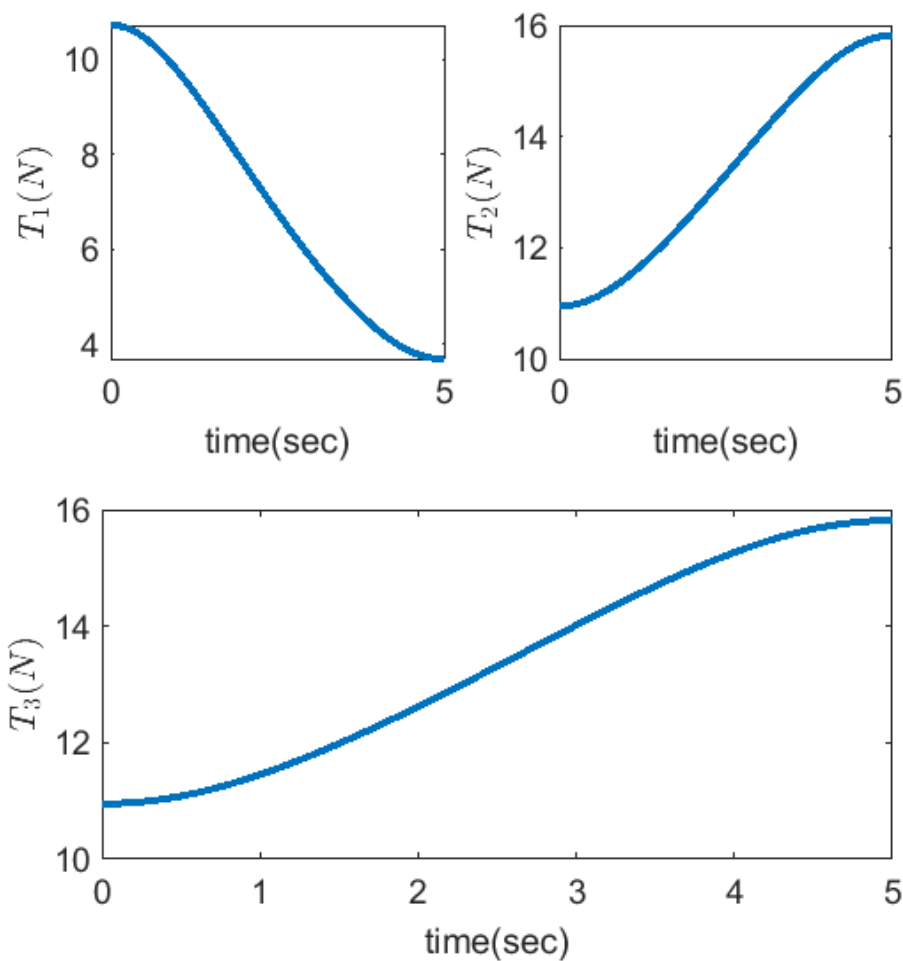
مقدار نیروی جک ۵۰ نیوتن در نظر گرفته شده است. حال با شبیه سازی، مقدار تغییرات طول کابل در شکل (۱۷-۳) سرعت کابل ها در شکل (۱۸-۳) و همچنین نیروی کششی کابل ها در شکل (۱۹-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۷-۳) تغییر طول کابل ها



شکل (۱۸-۳) سرعت خطی کابل ها



شکل (۳-۱۹) نیروی کششی هر یک از کابل ها

### ۳-۶ دینامیک مستقیم ربات

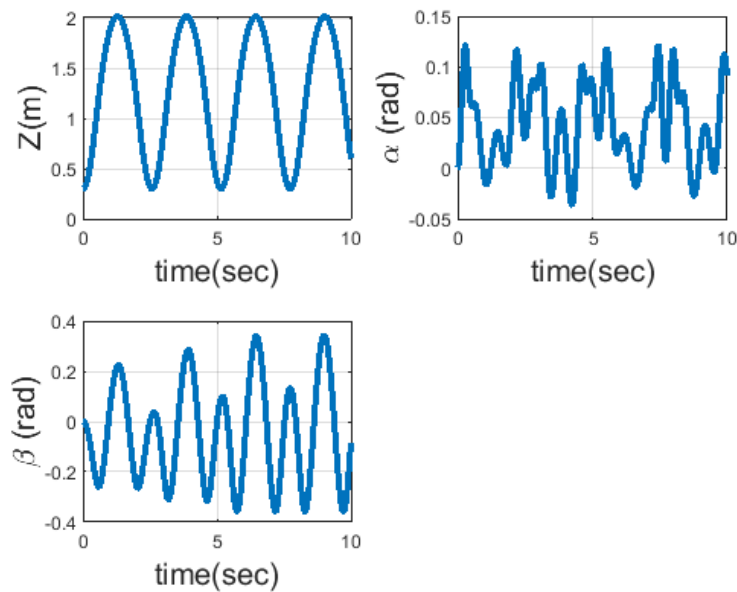
در قسمت دینامیک معکوس ربات حل گردید. در این بخش به حل دینامیک مستقیم ربات پرداخته می شود. در این بخش فرض می شود که نیروهای وارد بر ربات مشخص باشد و هدف بدست آوردن حرکت ربات می باشد. با توجه معادلات نیوتن و اویلر یعنی معادله های (۳-۲۰) و (۳-۲۹) می توان سه معادله برای توصیف حرکت که تنها وابسته به نیروهای عملگری کابلی و جک هستند به صورت زیر استخراج نمود:

$$\begin{bmatrix} T_{1,z} + T_{2,z} + T_{3,z} + mg + F_d \\ (r_1 \times T_1 + r_2 \times T_2 + r_3 \times T_3)_x \\ (r_1 \times T_1 + r_2 \times T_2 + r_3 \times T_3)_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\ddot{z} \\ I_x \ddot{\alpha} \\ I_y (\cos(\alpha)\ddot{\beta} - \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin(\alpha)) \end{bmatrix} \quad (38-3)$$

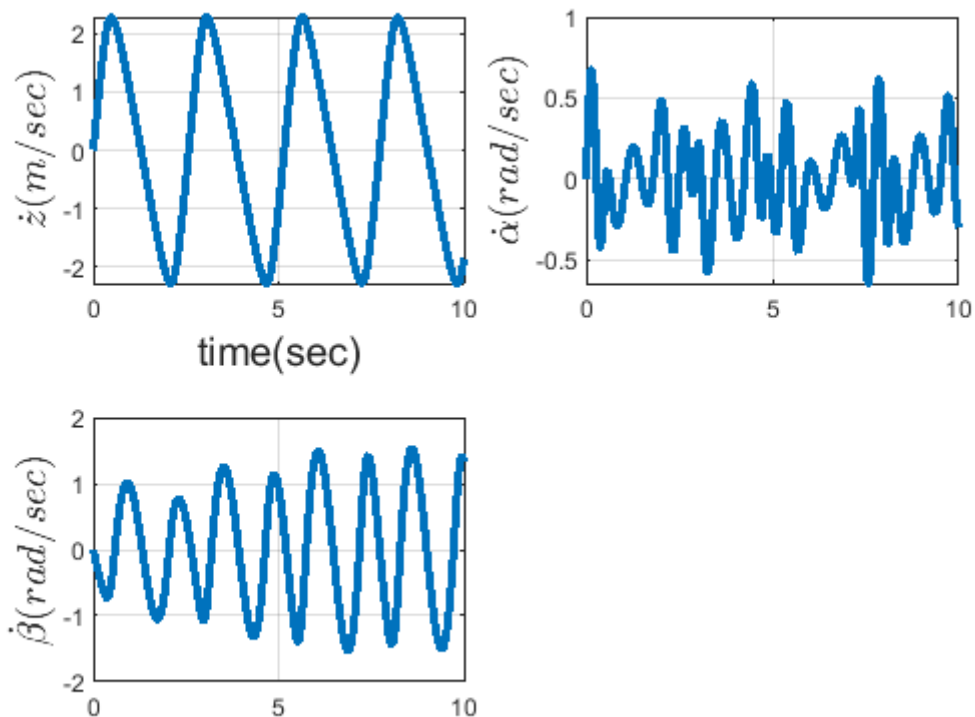
حال با استخراج معادله ها، به شبیه سازی پرداخته می شود. در این حالت پارامترهای مسئله به صورت زیر فرض می شود:

$$\begin{aligned} m &= 100\text{kg}, T_1 = 200\text{N}, T_2 = 200\text{N}, T_3 = 200\text{N} \\ f_d &= 1200\text{N} \\ L_3(0) &= 0.3; \dot{L}_3(0) = 0 \\ \theta_1(0) &= 0; \dot{\theta}_1(0) = 0 \end{aligned} \quad (39-3)$$

با نیروهای اعمال شده، میزان تغییرات ارتفاع صفحه متحرک، و همچنین میزان حرکت دورانی صفحه متحرک در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۰) ارتفاع صفحه متحرک و وضعیت دورانی آن بعد از اعمال نیروهای مورد نظر



شکل (۳-۲۱) سرعت صفحه متحرک

همچنین سرعت عمودی صفحه متحرک و همچنین سرعت زاویه ای آن در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است.

### ۳-۷ شناسایی و جداسازی خطا

در این پایانامه هدف اصلی شناسایی و جداسازی خطا می باشد. در حقیقت منظور از شناسایی خطا خطاهای موجود در موتور الکتریکی می باشد که همان عملگرهای سیستم می باشد که این خطا در مسیر مجری نهایی نیز نمایان می شود. در این جا از خطای فنریت کابل ها صرف نظر می شود و در نظر گرفته نمی شود. در شناسایی خطا هدف اصلی، یافتن یک شناساگر در سیستم هستیم که در این سیستم هنگامی که پارامتری دچار خطا می شود اولاً تشخیص دهد که خطا در سیستم ایجاد شده

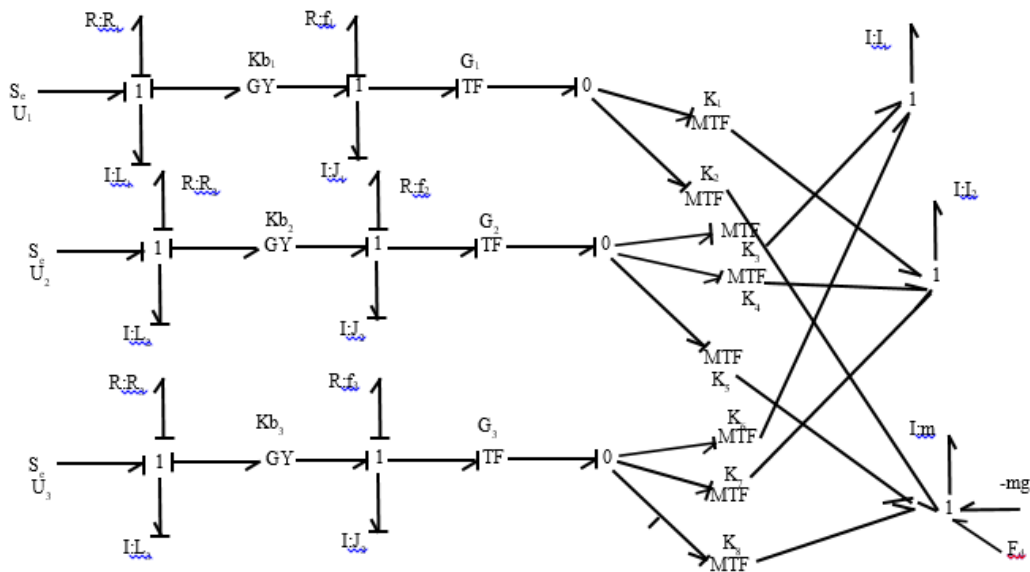
است و در مرحله بعد مشخص کنند که منشا اصلی خطا در سیستم چه بخشی می باشد. برای سهولت در حل مسئله در این جا فرض می شود که خطا در بخشی ها مشخص از سیستم ایجاد شود که می تواند به عنوان مثال یکی از منشاء های ان مقاومت الکتریکی موتور باشد حال برای هر یکی از این منشاء های خطا یک شناساگر به نام باقیمانده تعریف می شود که هنگامی که در آن پارامتر خطا وجود ندارد، مقدارش صفر می باشد و در غیر این صورت مقدار آن تغییر می کند و این شناساگر مختص ان منشا خطا می باشد و مستقل از خطاهای دیگر است. بنابراین در این جای عامل شناسایی خطا موقعیت مجری نهایی نمی باشد و این باقیمانده ها منشاء خطا می باشند.

### ۳-۷-۱ استخراج مدل باندگراف

از آنجا که هدف اصلی شناسایی و جداسازی خطا می باشد، بنابراین باید مدل باندگراف سیستم استخراج شود. برای ایجاد نیروی کششی از یک موتور الکتریکی استفاده می شود. رابطه بین کشش کابل و گشتاور موتور به صورت زیر می باشد:

$$\tau = rF, \omega = \frac{v}{r} \quad (۳-۴۰)$$

مدل باندگراف سیستم کلی ربات موازی کابلی با در نظر گرفتن سه موتور در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده است. در مدل باندگراف در نظر گرفته شده سه درجه آزادی که شامل تغییر ارتفاع، و دوران حول دو محور است در نظر گرفته می شود در نتیجه در سمت راست باندگراف سه اتصال 1 وجود دارد.



شکل (۳-۲۲) مدل باندگراف ربات موازی کابلی با در نظر گرفتن سه موتور

در باندگراف ترسیم شده هر یک از پارامترهای به کار رفته به صورت زیر تعریف می شود:

$U_1, U_2, U_3$ : به ترتیب ولتاژ ورودی موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$R_1, R_2, R_3$ : به ترتیب مقاومت الکتریکی موتور اول، دوم و سوم می باشد.

$L_1, L_2, L_3$ : به ترتیب ضریب خودالقایی موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$K_{b_1}, K_{b_2}, K_{b_3}$ : به ترتیب ثابت EMf موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$J_1, J_2, J_3$ : به ترتیب ممان اینرسی دورانی موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$f_1, f_2, f_3$ : به ترتیب ضریب اصطکاکی ویسکوز موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$G_1, G_2, G_3$ : ضریب تبدیل گیربکس و پولی می باشد که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$G_1 = \frac{r_1}{N_1}, G_2 = \frac{r_2}{N_2}, G_3 = \frac{r_3}{N_3} \quad (۴۱-۳)$$

که در رابطه بالا داریم:

$N_1, N_2, N_3$ : به ترتیب ضریب تبدیل گیربکس موتور الکتریکی اول، دوم و سوم می باشد.

$r_1, r_2, r_3$ : به ترتیب ضریب شعاع پولی متصل به موتورالکتریکی اول، دوم و سوم می باشد که کابل بر

روی آن پیچیده می شود.

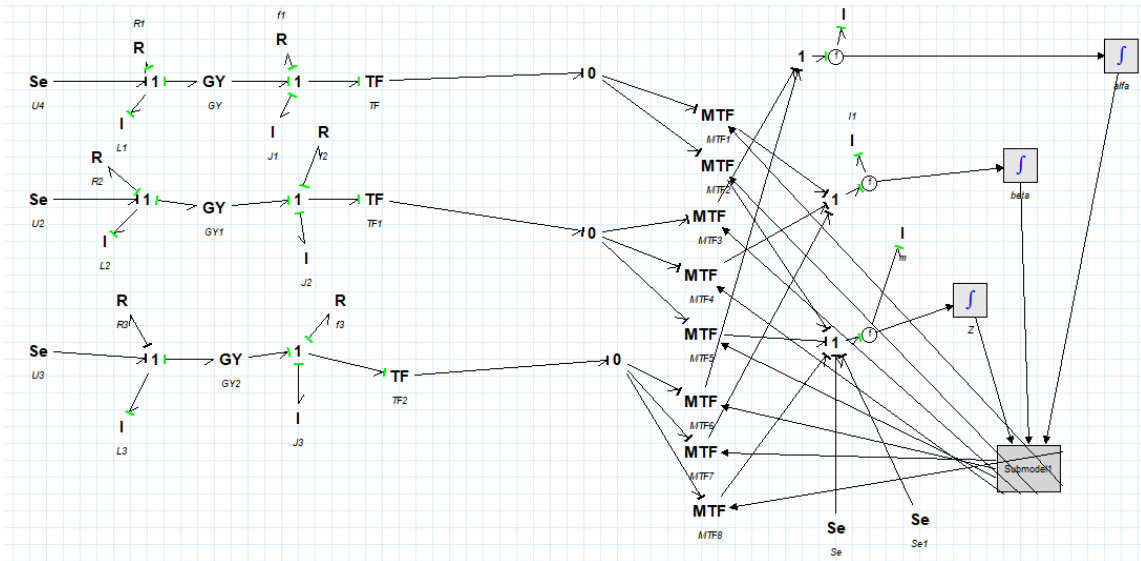
همچنین ضرایب  $K_1$  تا  $K_8$  به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= -\frac{L_1}{((b \cos(\beta) - a)(-b \sin(\beta)) + (Z - b \sin(\beta) - L_{f1})(-b \cos(\beta)))} \\
 K_2 &= -\frac{L_1}{(Z - b \sin(\beta) - L_{f1})} \\
 K_3 &= -\frac{L_2}{\left(\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \sin(\beta)\right) + \left(\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) - \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)\left(-\frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha)\right) + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f2}\right)\left(\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \cos(\beta)\right)\right)} \\
 K_4 &= -\frac{L_2}{\left(\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta)\right) + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f2}\right)\left(\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta)\right)\right)} \\
 K_5 &= -\frac{L_2}{\left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f2}\right)} \tag{۴۲-۳} \\
 K_6 &= -\frac{L_3}{\left(\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \sin(\beta)\right) + \left(-\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) + \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha)\right) + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f3}\right)\left(-\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) \cos(\beta)\right)\right)} \\
 K_7 &= -\frac{L_3}{\left(\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta)\right) + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f3}\right)\left(\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta)\right)\right)} \\
 K_8 &= -\frac{L_3}{\left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f3}\right)}
 \end{aligned}$$

که در رابطه بالا داریم:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \sqrt{(b \cos(\beta) - a)^2 + (Z - b \sin(\beta) - L_{f1})^2} \\
 L_2 &= \sqrt{\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) - \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) + \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f2}\right)^2} \tag{۴۳-۳} \\
 L_3 &= \sqrt{\left(-\frac{b}{2} \cos(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(-\frac{b\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha) + \frac{a\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(Z + \frac{b}{2} \sin(\beta) - \frac{b\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \cos(\beta) - L_{f3}\right)^2}
 \end{aligned}$$

نمودار باندگراف کل سیستم در نرم افزار 20sim در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۳) مدل باندگراف در نرم افزار 20sim

پارامترهای سیستم برای شبیه سازی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$U_1 = 20, U_2 = 20, U_3 = 20$$

$$R_1 = 1.32, R_2 = 1.32, R_3 = 1.32$$

$$L_1 = 2.3, L_2 = 2.3, L_3 = 2.3$$

$$K_{b1} = 0.407, K_{b2} = 0.407, K_{b3} = 0.407$$

$$f_1 = 0.003, f_2 = 0.003, f_3 = 0.003$$

$$J_1 = 0.002, J_2 = 0.002, J_3 = 0.002$$

(۳-۴۴)

$$N_1 = 13, N_2 = 13, N_3 = 13$$

$$r_1 = 0.15m, r_2 = 0.15m, r_3 = 0.15m$$

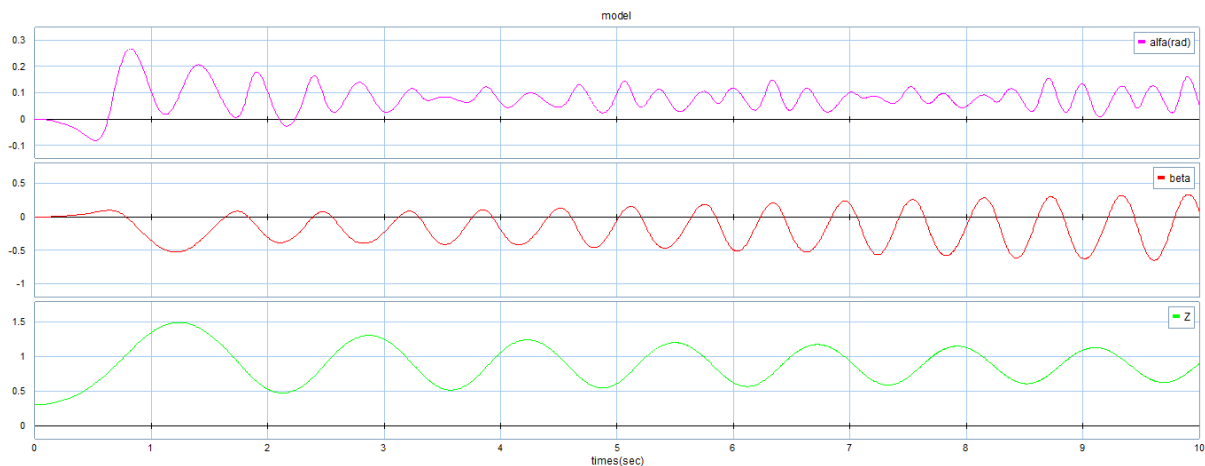
$$a = 0.6m, b = 0.15$$

$$L_{f1} = 0.9m, L_{f2} = 0.7m, L_{f3} = 0.6m$$

$$m = 100kg$$

بعد از شبیه سازی در نرم افزار 20 sim ارتفاع صفحه متحرک و وضعیت دورانی این صفحه در شکل (۳-۲۴) نشان

داده شده است.



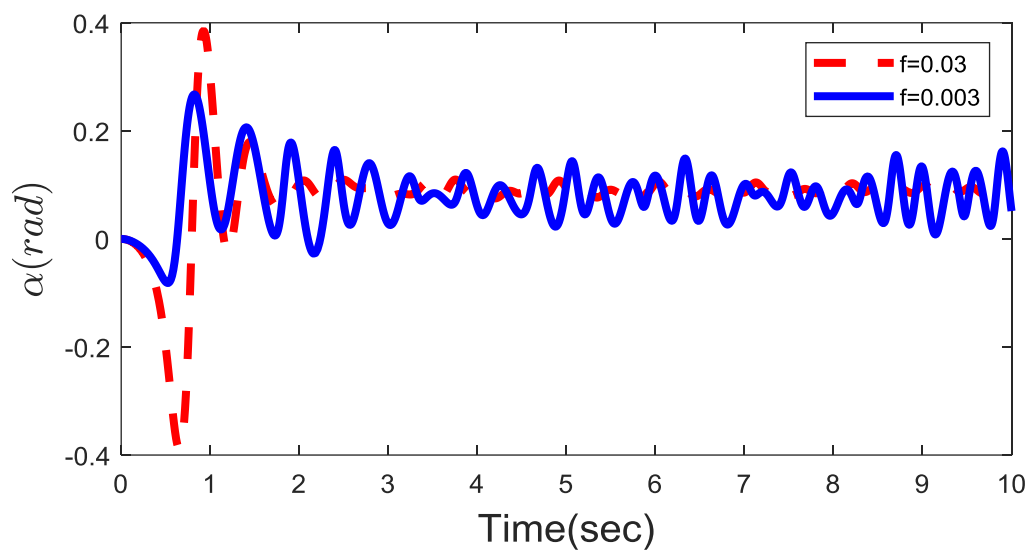
شکل (۳-۲۴) تغییر ارتفاع صفحه متحرک و وضعیت دورانی این صفحه

### ۲-۷-۳ تحلیل اثر محرکه دوار بر روی حرکت ربات

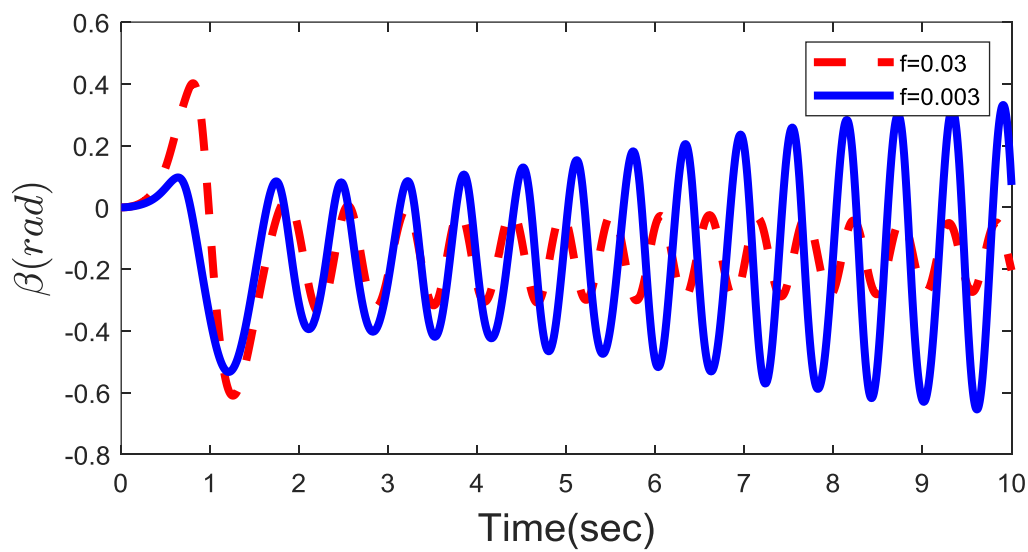
از آنجا که قسمت شناسایی و جداسازی خطا تنها خطا برای مقاومت الکتریکی موتور و ضریب اصطکاکی ویسکوز مورد بررسی قرار می‌گیرد در این بخش اثر خطای این دو بر روی مسیر حرکت ربات مورد بررسی قرار گرفته است برای ادامه اثر ضریب میرایی موتور بر روی مسیر نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب اصطکاکی ویسکوز در حقیقت همان ضریب میرایی بلبرینگ های موتور می باشد که معادله آن به صورت زیر است:

$$F_f = -f\dot{\theta} \quad (۳-۴۵)$$

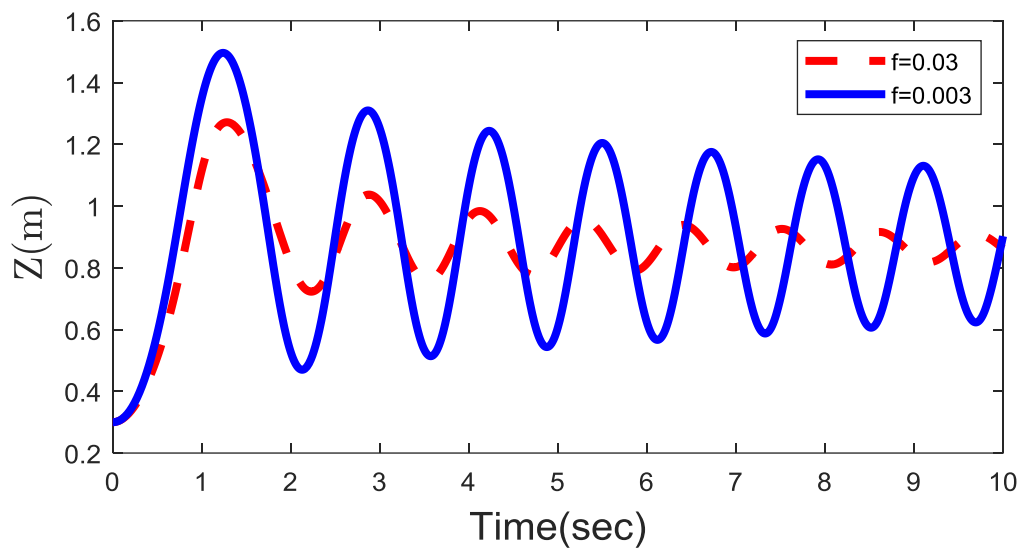
مشاهده می شود که هر چه ضریب میرایی موتور افزایش یابد میزان تغییرات صفحه متحرک کاهش می یابد.



شکل (۳-۲۵) اثر ضریب اصطکاک بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور x

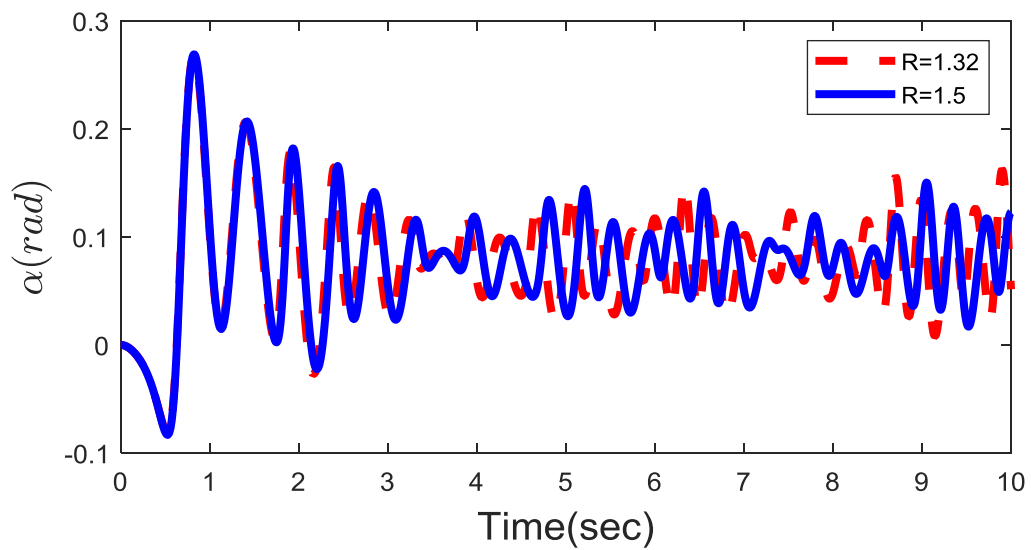


شکل (۳-۲۶) اثر ضریب اصطکاک بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور y

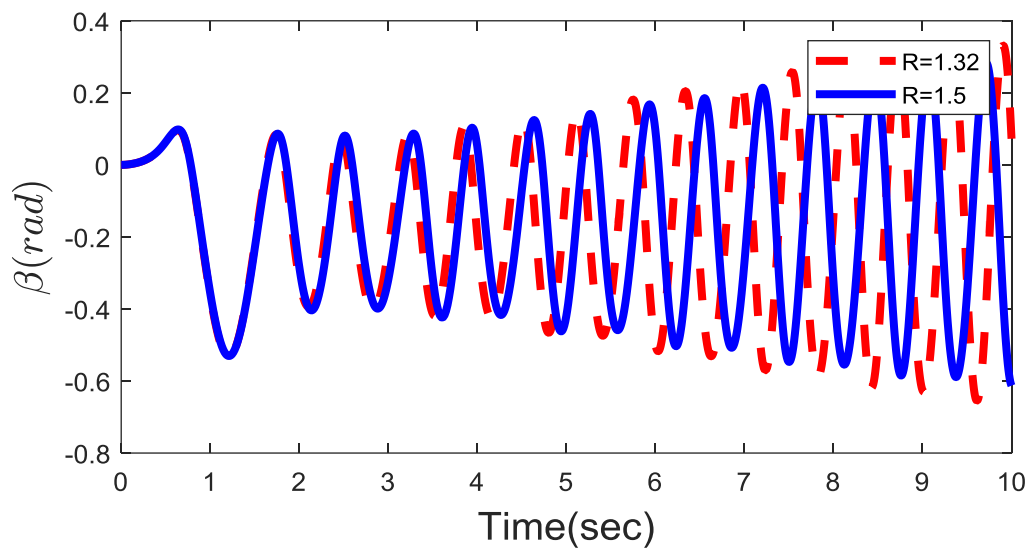


شکل (۳-۲۷) اثر ضریب اصطکاک بلبرینگ بر روی تغییر ارتفاع صفحه متحرک

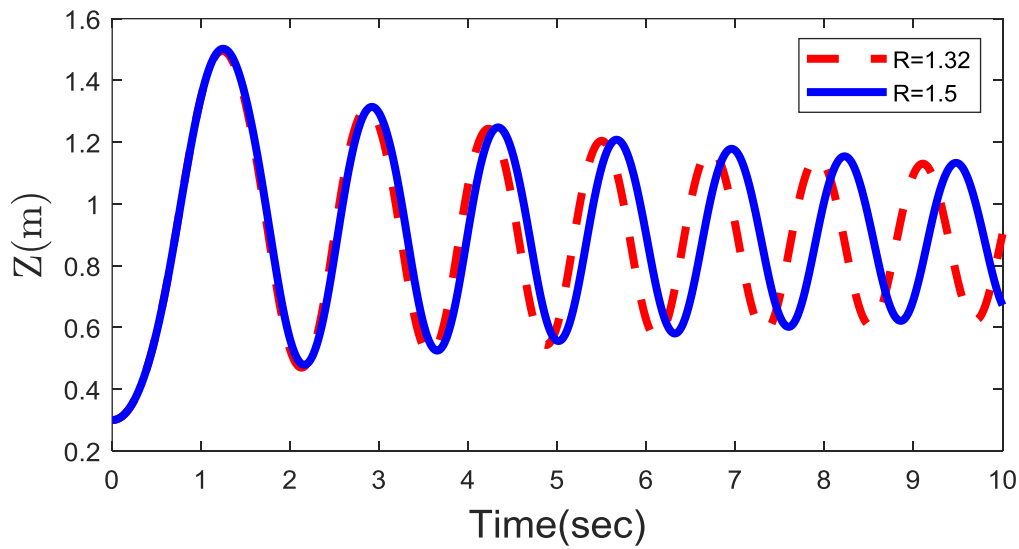
در ادامه تغییرات مقاومت موتور بر روی مسیر حرکت ربات مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۳-۲۸) اثر مقاومت بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور x



شکل (۳-۲۹) اثر مقاومت بر روی حرکت دورانی صفحه متحرک حول محور  $y$



شکل (۳-۳۰) اثر مقاومت بر روی تغییر ارتفاع صفحه متحرک

### ۳-۸ استخراج باقیمانده ها برای ربات موازی کابلی

اگر در اینجا فرض شود که خطای ایجاد شده به دلیل تغییر مقاومت الکتریکی موتور باشد، با استفاده از مدل باندگراف می توان باقیمانده را به صورت زیر محاسبه نمود. باقیمانده یک نمایشگر خطا می باشد که میزان اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبات انجام شده توسط مدل را مشخص می کند به عبارت دقیق تر به عنوان مثال در مدل باندگراف یک سیستم مکانیکی برای اتصال 1، برآیند نیروها صفر می باشد این پارامتر می توان به عنوان باقیمانده در نظر گرفته شود. در زمانی که خطایی در سیستم وجود ندارد، این عدد صفر خواهد بود و در غیر اینصورت میزان آن تغییر خواهد کرد. باقیمانده بر اساس مقادیر سیگنال های اندازه گیری شده و پارامترهای سیستم می باشد. بنابراین در دو حالت وجود خطا و عدم وجود خطا معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$F_1 = \left( L \frac{d}{dt} + R_e \right) y_1 + k_e y_2 - U_0 \quad (3-46)$$

که در رابطه بالا داریم:

$L$ : ضریب القایی موتور

$R_e$ : مقاومت الکتریکی موتور

$k_e$ : ضریب ثابت موتور

$y_1$ : جریان موتور

$y_2$ : سرعت زاویه ای موتور

$U_0$ : مقدار ولتاژ ورودی به موتور

حال با توجه به رابطه بالا، مقدار باقیمانده در فضای لاپلاس از رابطه زیر بدست می آید:

$$r_1 = \frac{1}{s} \frac{d\hat{F}_1}{ds} \quad (3-47)$$

جایی که با تبدیل لاپلاس از مقدار باقیمانده داریم:

$$\hat{F}_1 = (Ls + R_e) \hat{y}_1 + k_e \hat{y}_2 - \hat{U}_0 - y_1(0) \quad (48-3)$$

با مشتق گیری از رابطه (48-3) و تقسیم کل عبارت بر S داریم:

$$\hat{f}_1 = \left(\frac{L}{s}\right) \hat{y}_1 + (Ls + R_e) \frac{1}{s} \frac{d\hat{y}_1}{ds} + k_e \frac{1}{s} \frac{d\hat{y}_2}{ds} - \frac{1}{s} \frac{d\hat{U}_0}{ds} \quad (49-3)$$

با لاپلاس معکوس از رابطه (49-3) داریم:

$$r_1 = -Lty_1 + \int (Ly_1 - R_e \lambda y_1 - k_e \lambda y_2 + \lambda U_0) d\lambda \quad (50-3)$$

### ۲-۸-۳ الگوریتم معادلات تشخیص خطا

الگوریتم تشخیص خطا مطابق زیر می باشد:

- با در نظر گرفتن سنسورها در سیستم مقدار جریان الکتریکی موتور و سرعت زاویه ای موتور اندازه گیری می شود (در اینجا که مدل واقعی سیستم وجود ندارد، با انجام شبیه سازی، مقدار جریان و سرعت زاویه ای موتور محاسبه می گردد).
- سپس با توجه به معلوم بودن جریان موتور و سرعت زاویه ای آن مقدار باقیمانده از رابطه بالا به صورت برخط محاسبه می شود.
- در صورت عدم وجود خطا، مقدار باقیمانده صفر شده و غیر این صورت مقدار باقیمانده تغییر می کند.
- از آنجا که  $I_1$  مرتبط با خطای مقاومت موتور می باشد، در صورت تغییر آن و ایجاد خطا در مسیر حرکت صفحه متحرک، می توان نتیجه گرفت که منشا خطا مقاومت الکتریکی می باشد.

### ۳-۸-۳ استخراج معادلات با در نظر گرفتن عدم قطعیت

حال در ادامه فرض می شود که پارامترهای سیستم مانند مقاومت موتور و ضریب القایی سیستم دارای عدم قطعیت باشد. برای تعریف عدم قطعیت در این قسمت فرض می شود که به مقدار مرجع آن یک حد بالایی و یک حد پایینی که مقدار آن مشخص است اضافه می شود بنابراین مقدار حد بالایی و پایینی مقدار مقاومت و همچنین ضریب القایی موتور به صورت زیر تعریف می شوند، [9]:

$$\begin{aligned} [R_{1,L} \quad R_{1,U}] &= R_{1,n} \left( 1 + [\delta_{R_{1,L}} \quad \delta_{R_{1,u}}] \right), \delta_{R_{1,L}} = -\frac{|\Delta R_{1,L}|}{R_{1,n}}, \delta_{R_{1,u}} = \frac{|\Delta R_{1,u}|}{R_{1,n}} \\ [L_L \quad L_U] &= L_n \left( 1 + [\delta_{L_L} \quad \delta_{L_u}] \right), \delta_{L_L} = -\frac{|\Delta L_L|}{L_n}, \delta_{L_u} = \frac{|\Delta L_u|}{L_n} \end{aligned} \quad (51-3)$$

در رابطه بالا داریم:

$R_{1,L}$ : حد پایینی مقاومت الکتریکی

$R_{1,U}$ : حد بالایی مقاومت الکتریکی

$R_{1,n}$ : مقاومت الکتریکی مرجع

$\delta_{R_{1,L}}$ : مقدار واحد حد پایینی مقاومت الکتریکی

$\delta_{R_{1,u}}$ : مقدار واحد حد بالایی مقاومت الکتریکی

$\Delta R_{1,L}$ : میزان تغییرات حد پایینی مقاومت الکتریکی

$\Delta R_{1,u}$ : میزان تغییرات حد بالایی مقاومت الکتریکی

$L_L$ : حد پایینی ضریب القایی موتور

$L_U$ : حد بالایی ضریب القایی موتور

$L_n$ : ضریب القایی موتور مرجع

$\delta_{L_L}$ : مقدار واحد حد پایینی ضریب القایی موتور

$\delta_{L_u}$ : مقدار واحد حد بالایی ضریب القایی موتور

$\Delta L_{L_e}$ : میزان تغییرات حد پایینی ضریب القایی موتور

$\Delta L_{L_u}$ : میزان تغییرات حد بالایی ضریب القایی موتور

با جایگذاری مقادیر بالا در مقدار باقیمانده داریم:

$$\begin{aligned} \left[ \underline{r}_1 \quad \bar{r}_1 \right] &= -L_n \left( 1 + \left[ \delta_{L_e} \quad \delta_{L_u} \right] \right) t y_1 \\ &+ \int \left( L_n \left( 1 + \left[ \delta_{L_e} \quad \delta_{L_u} \right] \right) y_1 - R_{1,n} \left( 1 + \left[ \delta_{R_{1,L}} \quad \delta_{R_{1,u}} \right] \right) \lambda y_1 - k_e \lambda y_2 + \lambda U_0 \right) d\lambda \end{aligned} \quad (52-3)$$

اگر معادله بالا به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\begin{aligned} \left[ \underline{r}_1 \quad \bar{r}_1 \right] &= r_{1,n} + \left[ \underline{B}_1 \quad \bar{B}_1 \right] \\ r_{1,n} &= -L_n t y_1 + \int \left( L_n y_1 - R_{1,n} \lambda y_1 - k_e \lambda y_2 + \lambda U_0 \right) d\lambda \\ \left[ \underline{B}_1 \quad \bar{B}_1 \right] &= -L_n \left[ \delta_{L_e} \quad \delta_{L_u} \right] t y_1 + \int \left( L_n \left[ \delta_{L_e} \quad \delta_{L_u} \right] y_1 - R_{1,n} \left[ \delta_{R_{1,L}} \quad \delta_{R_{1,u}} \right] \lambda y_1 - k_e \lambda y_2 + \lambda U_0 \right) d\lambda \end{aligned} \quad (53-3)$$

حال می توان اثبات کرد که در حالتی که خطا داخل سیستم وجود ندارد، داریم:

$$-r_{1,n} \subseteq \left[ \underline{B}_1(t), \bar{B}_1(t) \right] \quad (54-3)$$

و برای زمانی که خطا داخل سیستم وجود دارد، داریم:

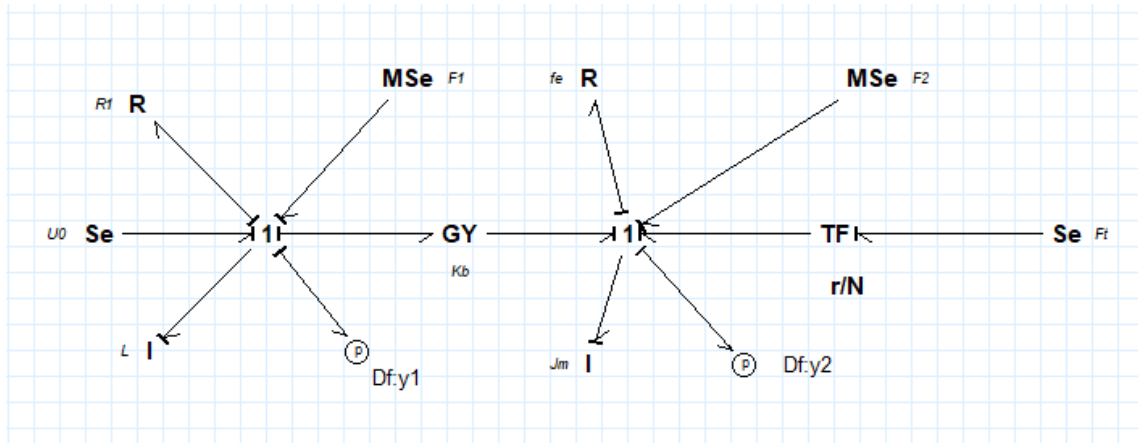
$$-r_{1,n} \not\subseteq \left[ \underline{B}_1(t), \bar{B}_1(t) \right] \quad (55-3)$$

### ۴-۸-۳ شناسایی و جداسازی با دو خطا

در این بخش فرض می شود که در سیستم دو خطا وجود دارد. این خطاها شامل مقاومت الکتریکی

موتور و مقاومت ویسکوز موتور الکتریکی می باشد. بدین منظور ابتدا مقادیر خطا بر روی مقاومت

الکتریکی و همچنین مقاومت ویسکوزیته موتور با المان جریان قدرت قابل تغییر<sup>۱</sup> بر روی باند گراف اعمال می شود. باند گراف با این تغییرات به صورت زیر می باشد:



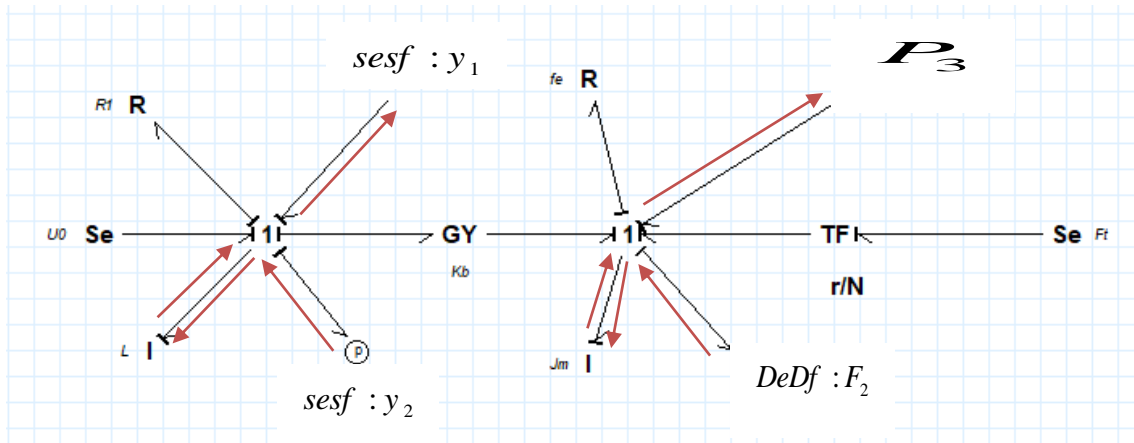
شکل (۳-۳۱) نمودار باندگراف ربات و اتصال سنسور جهت بررسی الگوریتم های شناسایی

در شکل (۳-۳۱) بر روی هر اتصال ۱ یک سنسور نصب شده است که  $Dy_1$  سنسور اندازه گیری جریان الکتریکی و  $Dy_2$  سنسور اندازه گیری مقدار سرعت زاویه ای می باشد. حال برای به دست آوردن مقدار پارامترهای دیفرانسیلی نمایشگر خطا ابتدا تمامی مسیرهای تعاملی بین ورودی خطا و سنسورها تشخیص داده می شود. بدین منظور به جای منبع خطا از المان  $DeDf$  و به جای سنسور از المان  $SeSf$  استفاده می شود. در حقیقت در این حالت فرض می شود که از سنسور تنها در یک مسیر جریان و توان انتقال می یابد و مسیرها دو تعاملی<sup>۲</sup> می باشند در حالت معمول در باندگراف ها مسیرها تک تعاملی می باشند که در یک مسیر جریان (به عنوان نمونه برای سیستم مکانیکی سرعت) و در مسیر عکس توان (به عنوان نمونه برای سیستم مکانیکی نیرو) جریان می یابد. اما در المان

<sup>۱</sup> Modulated effort source

<sup>۲</sup> bicausal

$SeSf$  تنها جریان خارج می شود و توان در این حالت صفر است و برای  $DeDf$  توان و جریان همزمان وارد می شود. حال باند گراف حاصل شده با تغییراتی که بیان شد، مطابق شکل (۳-۳۲) خواهد بود.



شکل (۳-۳۲) ارتباط بین سنسورها و ورودی خطاها

از آنجا که مسیرهای قرمز نشان داده شده در شکل ارتباط بین  $sesf : y_1 \rightarrow DeDf : F_1$  و  $sesf : y_2 \rightarrow DeDf : F_2$  را بیان می کنند و تمامی المان های ذخیره انرژی تعامل مشتقی را پذیرفته اند، بنابراین طبق قضایای موجود در مقاله [9] دو خطا قابل شناسایی و جدا پذیری می باشند. برای محاسبه باقیمانده ابتدا باید فرم دیفرانسیلی نمایشگر خطا به صورت زیر محاسبه شود:

$$F = \sum G_i u + \sum G_j y \quad (۵۶-۳)$$

که در رابطه بالا  $G_i$  ضریب مسیر  $i$ -ام می باشد که ورودی را به خروجی خطا مرتبط می کند و  $G_j$  ضریب مسیر  $j$ -ام می باشد که خروجی سنسور را به خروجی خطا مرتبط می کند. حال برای  $y_1$  داریم:

$$\begin{aligned}
sesf : y_1 \rightarrow R : R_1 \rightarrow DeDf : F_1 & \quad G_1 = R_1 \\
sesf : y_1 \rightarrow I : L \rightarrow DeDf : F_1 & \quad G_2 = \delta L \\
sesf : y_2 \rightarrow GY : k_e \rightarrow DeDf : F_1 & \quad G_3 = k_e \\
U : U_0 \rightarrow DeDf : F_1 & \quad G_3 = -1
\end{aligned}
\tag{۵۷-۳}$$

بنابراین  $F_1$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_1 = R_1 y_1 + L \delta y_1 + k_e y_2 - U_0 \tag{۵۸-۳}$$

حال برای  $y_2$  داریم:

$$\begin{aligned}
sesf : y_2 \rightarrow R : f_e \rightarrow DeDf : F_2 & \quad G_1 = f_e \\
sesf : y_2 \rightarrow I : J_m \rightarrow DeDf : F_2 & \quad G_2 = \delta J_m \\
sesf : y_1 \rightarrow I : L \rightarrow DeDf : F_2 & \quad G_3 = -k_e \\
U : U_2 \rightarrow TF : \frac{r}{N} \rightarrow DeDf : F_1 & \quad G_3 = \frac{r}{N}
\end{aligned}
\tag{۵۹-۳}$$

بنابراین  $F_2$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_2 = f_e y_2 + J_m \delta y_2 - k_e y_1 + \frac{r}{N} U_2 \tag{۶۰-۳}$$

با توجه به باندگراف ترسیم شده و همچنین مرجع [9] مقدار باقیمانده از رابطه زیر محاسبه می

شود:

$$r_2 = \frac{1}{s} \frac{d\hat{F}_2}{ds} \tag{۶۱-۳}$$

که برای این بخش پارامتر خطا  $\hat{F}_2$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\hat{F}_2 = -k_e y_1 + (J_m s + f_e) y_2 + \frac{F_1 r}{N} \tag{۶۲-۳}$$

با قراردادن معادله (۶۲-۳) در (۶۱-۳) داریم

$$r_2 = \frac{1}{s} \frac{d}{ds} \left( -k_e y_1 + (J_m s + f_e) y_2 - \frac{F_1 r}{N} \right) = -k_e \frac{1}{s} \frac{dy_1}{ds} + \frac{J_m}{s} y_2 + J_m \frac{dy_2}{ds} + \frac{f_e}{s} \frac{dy_2}{ds} + \frac{r}{Ns} \frac{dF_1}{ds} \tag{۶۳-۳}$$

با تبدیل لاپلاس معکوس از رابطه (۶۳-۳) داریم

$$r_2(t) = -J_m t y_2 + \int \left( k_e \lambda y_1 + J_m y_2 - f_e \lambda y_2 + \frac{r}{N} \lambda F_1 \right) d\lambda \quad (64-3)$$

### ۵-۸-۳ استخراج معادلات با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سیستم

در این بخش فرض می شود که عدم قطعیت در پارامترهای سیستم وجود داشته باشد. عدم قطعیت ها در ممان اینرسی موتور و ضریب ویسکوز موتور می باشد. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} [J_{m,L} \quad J_{m,U}] &= J_{m,n} \left( 1 + \begin{bmatrix} \delta_{J_{m,L}} & \delta_{J_{m,u}} \end{bmatrix} \right), \delta_{J_{m,L}} = -\frac{|\Delta J_{m,L}|}{J_{m,n}}, \delta_{J_{m,u}} = \frac{|\Delta J_{m,u}|}{J_{m,n}} \\ [f_{e,L} \quad f_{e,U}] &= f_{e,n} \left( 1 + \begin{bmatrix} \delta_{f_{e,L}} & \delta_{f_{e,u}} \end{bmatrix} \right), \delta_{f_{e,L}} = -\frac{|\Delta f_{e,L}|}{f_{e,n}}, \delta_{f_{e,u}} = \frac{|\Delta f_{e,u}|}{f_{e,n}} \end{aligned} \quad (65-3)$$

با جایگذاری (۶۵-۳) در (۶۴-۳) داریم:

$$\begin{aligned} r_2(t) &= -J_{m,n} \left( 1 + \begin{bmatrix} \delta_{J_{m,L}} & \delta_{J_{m,u}} \end{bmatrix} \right) t y_2 + \\ &\int \left( k_e \lambda y_1 + J_{m,n} \left( 1 + \begin{bmatrix} \delta_{J_{m,L}} & \delta_{J_{m,u}} \end{bmatrix} \right) y_2 - f_{e,n} \left( 1 + \begin{bmatrix} \delta_{f_{e,L}} & \delta_{f_{e,u}} \end{bmatrix} \right) \lambda y_2 - \frac{r}{N} \lambda F_1 \right) d\lambda \end{aligned} \quad (66-3)$$

اگر رابطه (۶۶-۳) به صورت زیر بازنویسی شود:

$$[\underline{r}_2 \quad \overline{r}_2] = r_{2,n} + \begin{bmatrix} B_2 & \overline{B}_2 \end{bmatrix} \quad (67-3)$$

جایی که داریم:

$$\begin{aligned} r_{2,n} &= -J_{m,n} t y_2 + \int \left( k_e \lambda y_1 + J_{m,n} y_2 - f_{e,n} \lambda y_2 - \frac{r}{N} \lambda F_1 \right) d\lambda \\ \begin{bmatrix} B_2 & \overline{B}_2 \end{bmatrix} &= -J_{m,n} \begin{bmatrix} \delta_{J_{m,L}} & \delta_{J_{m,u}} \end{bmatrix} t y_2 + \int \left( J_{m,n} \begin{bmatrix} \delta_{J_{m,L}} & \delta_{J_{m,u}} \end{bmatrix} y_2 - f_{e,n} \begin{bmatrix} \delta_{f_{e,L}} & \delta_{f_{e,u}} \end{bmatrix} \lambda y_2 \right) d\lambda \end{aligned} \quad (68-3)$$

روابط شناسایی و جداسازی مانند حالت قبل می باشد.

### ۳-۸-۶ شبیه سازی نتایج

برای شبیه سازی چنین سیستمی فرض می شود که مقدار پارامترهای سیستم به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} L = 2.3, R = 1.32, K_b = 0.407, k_e = 0.01 \\ J = 0.002, B = 0.003, K_m = 10^4 \end{aligned} \quad (۳-۶۹)$$

همچنین مقدار پارامترهای ربات به صورت زیر تعریف می شود:

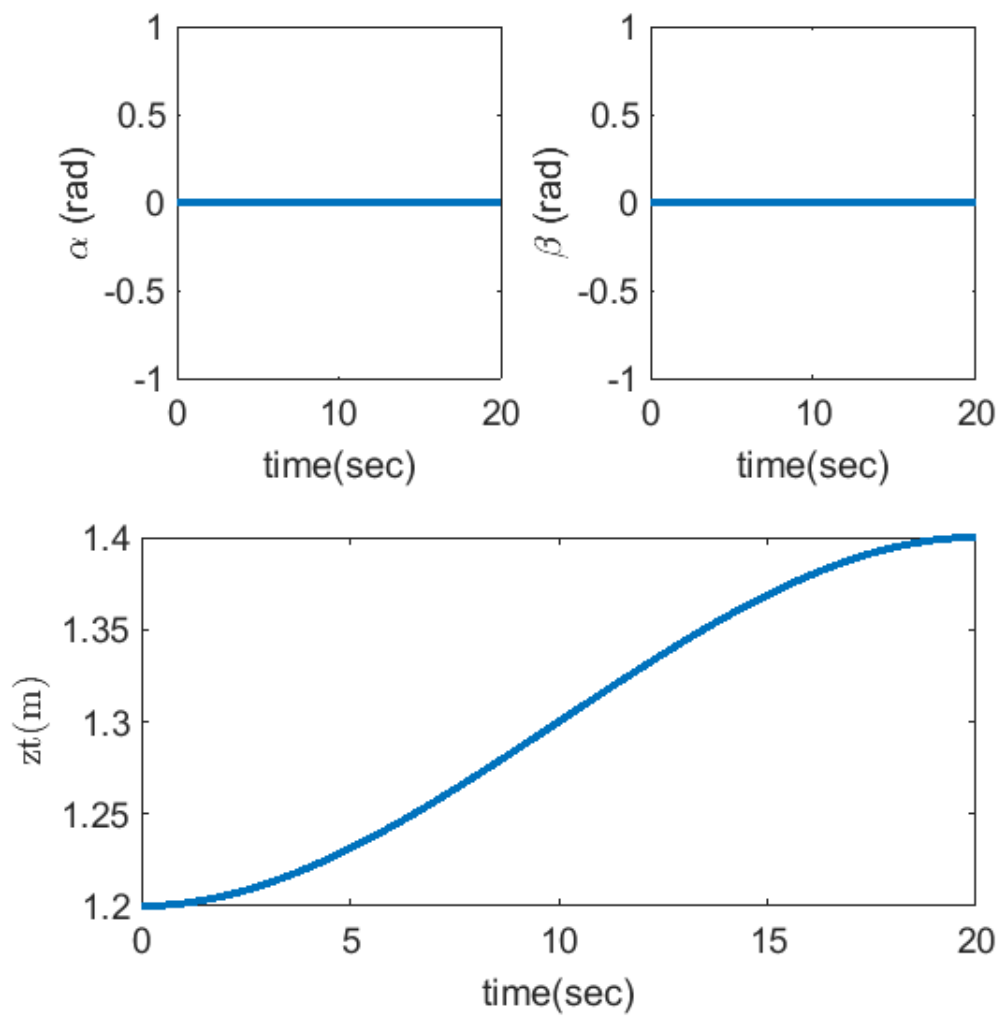
$$\begin{aligned} a = 0.6\text{m}, L_{f1} = 0.9\text{m} \\ L_{f2} = 0.8\text{m}, L_{f3} = 0.7\text{m}, b = 0.15\text{m} \\ M = 0.2\text{Kg}, d = 0.3\text{m} \end{aligned} \quad (۳-۷۰)$$

مسیر حرکت مطلوب برای صفحه متحرک به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} Z_t = a_{3,Z_t} t^3 + a_{2,Z_t} t^2 + a_{1,Z_t} t + a_{0,Z_t}, Z_t(0) = 1.2, Z_t(t_f) = 1.4, \\ \dot{Z}_t(0) = 0, \dot{Z}_t(t_f) = 0, t_f = 20, \alpha = 0, \beta = 0 \end{aligned} \quad (۳-۷۱)$$

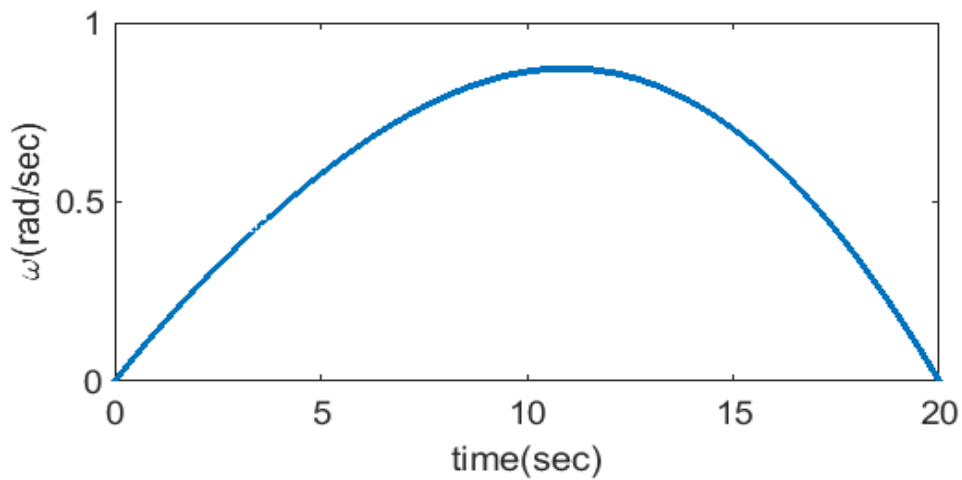
در این حالت فرض می شود که صفحه متحرک فقط در راستای Z حرکت کند. بنابراین نمودار مسیر

حرکت مطابق شکل (۳-۳۳) می باشد.



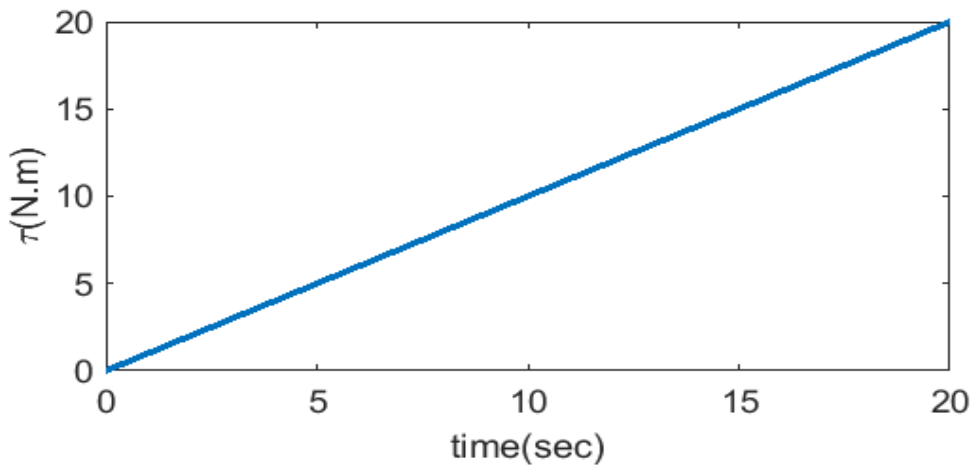
شکل (۳-۳۳) مسیر حرکت صفحه متحرک

سرعت زاویه ای موتور نیز مطابق شکل (۳-۳۴) می باشد.



شکل (۳-۳۴) سرعت زاویه موتور الکتریکی

همچنین مقدار گشتاور موتور نیز مطابق شکل (۳-۳۵) می باشد.



شکل (۳-۳۵) گشتاور ورودی به موتور الکتریکی

برای بدست آوردن مقادیر گشتاور از یک مسئله بهینه سازی نیز استفاده شده است زیرا از معادلات دینامیکی به راحتی نمی توان مقادیر نیروهای کششی کابل ها و در ادامه گشتاور موتورهای الکتریکی را محاسبه نمود. علت این امر را می توان در این موضوع جستجو کرد تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر است. تابع هزینه در این جا به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\min T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 \quad (72-3)$$

$$\sum F = m\bar{a}, \sum M_G = I\bar{a}$$

یک کنترلر ولتاژ نیز بر روی موتور الکتریکی در نظر گرفته شده است به عبارت دیگر مقدار ولتاژ ورودی به موتور به گونه ای کنترل می شود که خروجی موتور مسیر مطلوب پیمایش شود. کنترلر استفاده شده PID می باشد. مقدار پارامترهای کنترلر به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

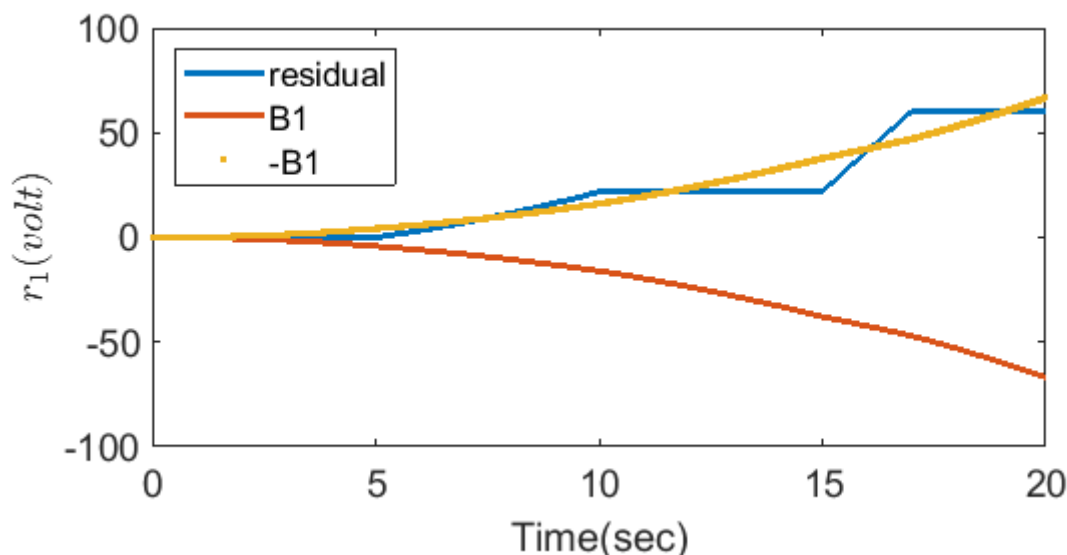
$$K_p = 100, K_I = 200, K_D = 10 \quad (73-3)$$

در این حالت نیز فرض شده است که عدم قطعیت هایی به صورت زیر بر روی مقاومت الکتریکی و مقاومت القایی به صورت زیر باشد:

$$\Delta R_1 = -0.1, \Delta R_U = 0.1 \quad (74-3)$$

$$\Delta L_1 = -0.1, \Delta L_U = 0.1$$

حال اگر در زمان  $t = 5 \text{ sec}$  مقدار مقاومت الکتریکی به ۱,۵ تغییر مقدار دهد و در زمان ۱۰ ثانیه به مقدار اولیه خود باز می گردد و سپس در زمان ۱۵ ثانیه به مقدار ۱,۷ تغییر می کند و سپس در ۱۷ ثانیه به مقدار اولیه خود باز می گردد. مقدار باقیمانده  $r_1$  مطابق شکل (۳۶-۳) خواهد بود.



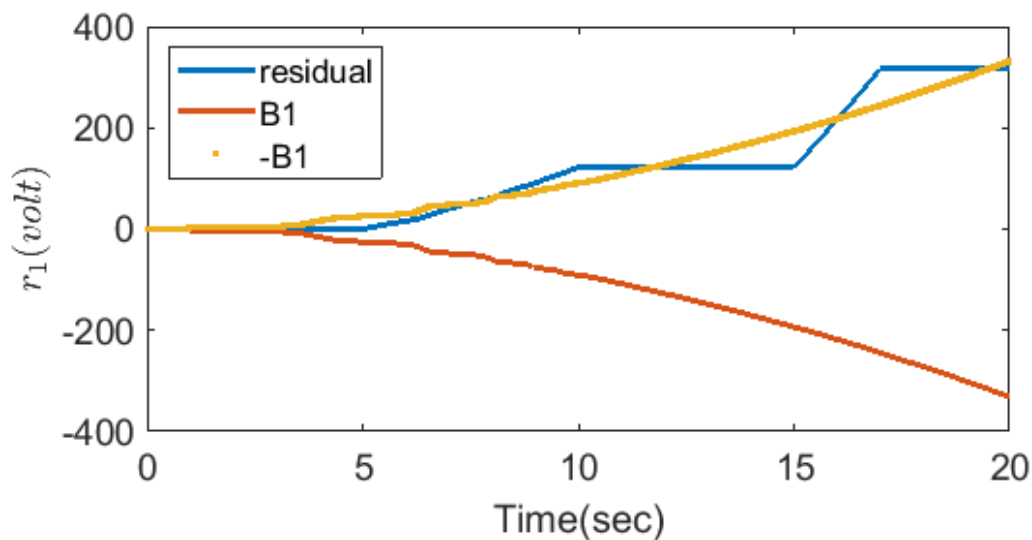
شکل (۳۶-۳) مقدار باقیمانده مرتبط با مقاومت الکتریکی

در هنگامی که عدم قطعیت در سیستم وجود دارد، در هنگام عدم وجود خطا باید مقدار باقیمانده در محدوده حد بالایی و پایینی  $B_1$  قرار گیرد و هنگامی که خطا وجود دارد مقدار باقیمانده از محدوده مشخص شده عبور می کند. همانگونه که از نمودارها مشخص است در ثانیه ۵ که خطا در سیستم ایجاد می شود، مقدار باقیمانده شروع به افزایش پیدا می کند و در زمان حدود ۸ ثانیه از حد بالایی عبور پیدا می کند این گویای شناسایی خطا در سیستم می باشد اما بعد ۱۰ ثانیه که خطایی در سیستم وجود ندارد رشد مقدار باقیمانده متوقف می شود به طوری که در ثانیه حدود ۱۱ مقدار باقیمانده به محدوده مورد نظر باز می گردد و نشانگر این است که خطایی در سیستم وجود ندارد حال هنگامی که در ثانیه ۱۵ دوباره خطا در سیستم ایجاد می گردد مقدار خطا دوباره شروع به افزایش پیدا می کند و در ثانیه ۱۶ از حد بالایی عبور می کند که این نشانگر وجود خطا در سیستم می باشد و در ثانیه ۱۷ هنگامی که خطا از بین می رود، دوباره به محدوده مورد نظر باز می گردد.

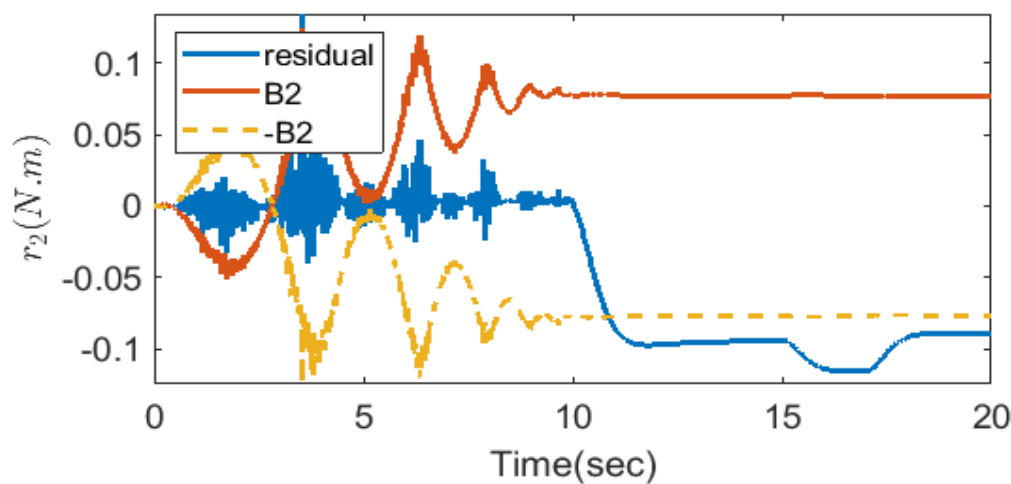
### ۳-۸-۷ شبیه سازی برای دو خطا

در این قسمت از دو شناساگر معرفی شده برای مقاومت الکتریکی و ضریب میرایی بلبرینگ در شناسایی و جداسازی خطا استفاده می شود. در این جا مانند قبل برای مقاومت الکتریکی فرض می شود در دو بازه بین ۵ تا ۱۰ و ۱۵ تا ۱۷ خطا در سیستم ایجاد شود همانطور که در شکل (۳-۳۷) برای  $r1$  قابل مشاهده است، در این دوبازه مقدار باقیمانده از محدوده مجاز مشخص شده در شکل خارج شده و نماینگر این است که در سیستم خطا وجود دارد. برای ضریب اصطکاک ویسکوز نیز فرض می شود که در محدوده بعد از ده ثانیه دچار خطا گردد. همانطور که از شکل (۳-۳۸) مشخص است، تا زمان ده ثانیه، مقدار باقیمانده در محدوده مجاز قرار دارد و بعد از آن به دلیل وجود خطا در سیستم از محدوده مجاز خارج می شود. همچنان که از نمودارها مشخص است، این دو باقیمانده از یکدیگر مستقل می باشند و هیچ برهم کنشی بر روی یکدیگر ندارند. به عبارت دقیق تر، هنگامی که

خطا در مقاومت ایجاد می شود تنها مقدار  $r_1$  تغییر می کند و مقدار  $r_2$  ثابت است و همین موضوع برای باقیمانده دوم نیز صادق است. در یک سیستم واقعی با مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسور ها که در این سرعت زاویه ای و جریان الکتریکی می باشد، می توان مقادیر باقیمانده را به طور برخط محاسبه نمود و در صورت وجود خطا با بررسی شروطی که در بالا ذکر گردید، بروز خطا را تشخیص داد و همچنین مشخص نمود که این منشا خطا از کجا می باشد.



شکل (۳-۳۷) باقیمانده مرتبط با خطای مقاومت الکتریکی



شکل (۳-۳۸) باقیمانده مرتبط با ضریب اصطکاک بلبرینگ

### ۳-۹ نتیجه گیری

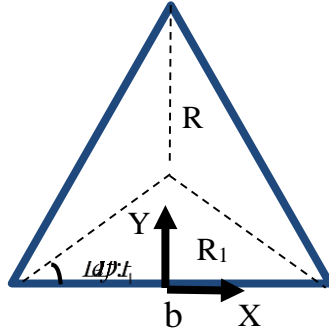
در این فصل ابتدا مدل سینماتیکی و دینامیکی ربات موازی کابلی استخراج گردید. سپس با استخراج مدل باندگراف الگوریتم شناسایی و جداسازی خطا بر روی آن پیاده سازی گردید و در انتها با شبیه سازی الگوریتم های مورد نظر صحت سنجی شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که این الگوریتم می تواند با معرفی پارامتری به عنوان باقیمانده خطاهایی که در سیستم ایجاد می شوند را شناسایی کرد و محل خطا را نیز به طور دقیق مشخص نمایند.

### ۳-۱۰ پیشنهادها برای کارهای آینده

بعد از انجام این کار موارد زیر به عنوان پیشنهاد جهت پژوهش های آتی پیشنهاد می شود:

- شناسایی و جداسازی خطاهای دیگر علاوه بر خطاهای مرتبط با عملگرها مانند خطای سختی کابل ها
- افزودن درجات آزادی بیشتر به صفحه متحرک ربات و پیاده سازی الگوریتم های شناسایی و جداسازی خطا
- استفاده از الگوریتم های شناسایی و جداسازی مبتنی بر روابط ریاضی و مقایسه عملکرد آنها با الگوریتم های مبتنی بر باندگراف

## پیوست الف: اثبات ممان اینرسی



شکل الف ۱. مثلث مورد نظر جهت استخراج ممان اینرسی

برای یک مثلث متساوی الاضلاع داریم:

$$h = \frac{b\sqrt{3}}{2} \Rightarrow b = \frac{2h}{\sqrt{3}} \quad (\text{الف.۱})$$

همچنین داریم:

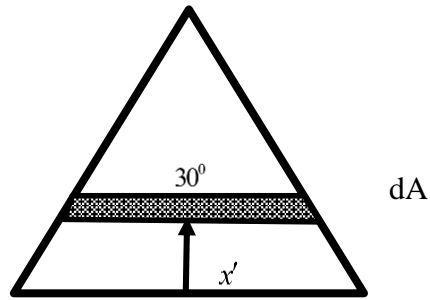
$$R = \frac{b}{\sqrt{3}} \Rightarrow R = \frac{2h}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{2h}{3} \quad (\text{الف.۲})$$

با جایگذاری (الف.۱) در (الف.۲) داریم:

$$R_1 = \frac{b}{2\sqrt{3}} = \frac{2h}{\sqrt{3}} \frac{1}{2\sqrt{3}} = \frac{h}{3} \quad (\text{الف.۳})$$

رابطه کلی برای ممان اینرسی حول محور X به صورت زیر است:

$$I_x = \int r^2 dm = \int y^2 \rho t dA \quad (\text{الف.۴})$$



شکل الف ۲. نحوه المان انتخاب شده جهت استخراج ممان اینرسی

با توجه به شکل الف ۲ و انتخاب المان مناسب می توان رابطه (الف.۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I_x = \int r^2 dm = \int_0^h y^2 \rho t x' dy \quad (\text{الف.۵})$$

با توجه به شکل بالا برای یک مثلث داریم:

$$\frac{x'}{b} = \frac{h-y}{h} \Rightarrow x' = b \left( 1 - \frac{h}{y} \right) \quad (\text{الف.۶})$$

با جایگذاری ۰ در (الف.۵) داریم:

$$\begin{aligned} I_x &= \int r^2 dm = \int_0^h y^2 \rho t b \left( 1 - \frac{h}{y} \right) dy \Rightarrow I_x = \rho t b \int_0^h y^2 \left( 1 - \frac{h}{y} \right) dy \\ &\Rightarrow I_x = \rho t b \int_0^h \left( y^2 - \frac{y^3}{h} \right) dy \Rightarrow I_x = \rho t b \left( \frac{y^3}{3} - \frac{y^4}{4h} \right)_0^h \\ &\Rightarrow I_x = \rho t b \frac{h^3}{12} \end{aligned} \quad (\text{الف.۷})$$

برای یک مثلث، جرم به صورت زیر تعریف می شود:

$$m = \rho A t = \rho \frac{bh}{2} t \quad (\text{الف.۸})$$

با استفاده از روابط ۰ و (الف.۸) داریم:

$$I_x = \frac{mh^2}{6} \quad (\text{الف.۹})$$

از آنجا که ممان اینرسی محاسبه شده حول قاعده مثلث می باشد با قوانین انتقال برای ممان های اینرسی، ممان محاسبه حول محور گذرنده از مرکز جرم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I_x = I_C + mr^2 \quad (\text{الف. ۱۰})$$

که در رابطه بالا  $I_C$  ممان اینرسی حول محور گذرنده از مرکز جرم بوده و  $I_x$  ممان اینرسی حول محور قاعده مثلث بوده و  $r$  فاصله عمودی بین قاعده مثلث تا مرکز جرم می باشد. حال داریم:

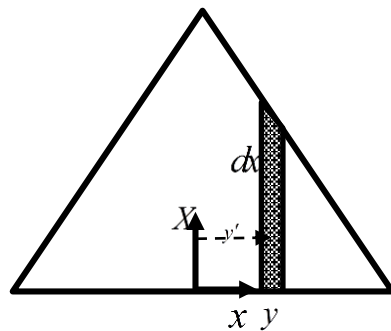
$$\frac{mh^2}{6} = I_{x,C} + m\left(\frac{h}{3}\right)^2 \Rightarrow I_{x,C} = \frac{mh^2}{6} - \frac{mh^2}{9} = \frac{mh^2}{18} \quad (\text{الف. ۱۱})$$

با جایگذاری ۰ در ۰ داریم:

$$I_{x,C} = \frac{m}{18} \left(\frac{3R}{2}\right)^2 = \frac{mR^2}{8} \quad (\text{الف. ۱۲})$$

ممان اینرسی حول محور  $y$  از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$I_{y,c} = \int r^2 dm = \int r^2 \rho t dA \quad (\text{الف. ۱۳})$$



شکل الف. ۳ المان انتخاب شده جهت استخراج ممان اینرسی

با توجه به المان انتخاب شده در شکل الف. ۳، می توان ممان اینرسی (الف. ۱۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$I_{y,c} = \int x^2 \rho t y' dx \quad (\text{الف. ۱۴})$$

از مثلث بالا داریم:

$$\frac{y'}{h} = \frac{\frac{b}{2} - x}{\frac{b}{2}} \Rightarrow y' = h \left( 1 - \frac{2x}{b} \right) \quad (\text{الف. ۱۵})$$

با جایگذاری (الف. ۱۵) در (الف. ۱۴) داریم:

$$I_{y,c} = \rho t \int x^2 h \left( 1 - \frac{2x}{b} \right) dx \Rightarrow I_{y,c} = \rho t \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} x^2 h \left( 1 - \frac{2x}{b} \right) dx$$

$$I_{y,c} = \rho t h \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left( x^2 - \frac{2x^3}{b} \right) dx = \rho t h \left( \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{2b} \right) \Big|_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \Rightarrow \quad (\text{الف. ۱۶})$$

$$I_{y,c} = \frac{\rho t h a^3}{12}$$

با جایگذاری رابطه (الف. ۸) در (الف. ۱۶) داریم:

$$I_{y,c} = \frac{m a^2}{6} \quad (\text{الف. ۱۷})$$

با توجه به (الف. ۱۷) داریم:

$$I_{y,c} = \frac{m}{6} (\sqrt{3}R)^2 = \frac{mR^2}{2} \quad (\text{الف. ۱۸})$$

همچنین برای ممان اینرسی حول محور Z داریم:

$$I_{z,c} = I_{x,c} + I_{y,c} = \frac{mR^2}{2} + \frac{mR^2}{8} = \frac{5mR^2}{8} \quad (\text{الف. ۱۹})$$

- [1] J. U. Thoma, *Introduction to bond graphs and their applications*. Elsevier, 2016.
- [2] A. Mukherjee and R. Karmakar, *Modelling and simulation of engineering systems through bondgraphs*. Alpha Science Int'l Ltd., 2000.
- [3] B. O. Bouamama, K. Medjaher, M. Bayart, A. Samantaray, and B. Conrard, "Fault detection and isolation of smart actuators using bond graphs and external models," *Control engineering practice*, vol. 13, no. 2, pp. 159-175, 2005.
- [4] R. J. Patton and J. Chen, "Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 5, pp. 671-682, 1997.
- [5] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations," *Control engineering practice*, vol. 5, no. 5, pp. 653-661, 1997.
- [6] M. Staroswiecki and G. Comtet-Varga, "Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems," *Automatica*, vol. 37, no. 5, pp. 687-699, 2001.
- [7] M. Staroswiecki, "Quantitative and qualitative models for fault detection and isolation," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 14, no. 3, pp. 301-325, 2000.
- [8] A. K. Samantaray and S. K. Ghoshal, "Bicausal bond graphs for supervision: From fault detection and isolation to fault accommodation," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 1, pp. 1-28, 2008.
- [9] M. Fliess\*, C. Join, and H. Sira-Ramírez, "Robust residual generation for linear fault diagnosis: an algebraic setting with examples," *International Journal of Control*, vol. 77, no. 14, pp. 1223-1242, 2004.
- [10] J. C. Cruz-Victoria, R. Martínez-Guerra, and J. J. Rincón-Pasaye, "On nonlinear systems diagnosis using differential and algebraic methods," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 2, pp. 102-118, 2008.

- [11] J.-M. Dion, C. Commault, and J. Van Der Woude, "Generic properties and control of linear structured systems: a survey," *Automatica*, vol. 39, no. 7, pp. 1125-1144, 2003.
- [12] S. Benmoussa, B. O. Bouamama, and R. Merzouki, "Bond graph approach for plant fault detection and isolation: Application to intelligent autonomous vehicle," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 585-593, 2013.
- [13] W. Borutzky, *Bond graph model-based fault diagnosis of hybrid systems*. Springer, 2015.
- [14] L. Cauffriez, S. Grondel, P. Loslever, and C. Aubrun, "Bond Graph modeling for fault detection and isolation of a train door mechatronic system," *Control Engineering Practice*, vol. 49, pp. 212-224, 2016.
- [15] H. Liu and L. Yu, "Analytical method of fault detection and isolation based on bond graph for electromechanical actuator," in *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2017: IEEE, pp. 393-397.
- [16] M.-S. Jha, G. Dauphin-Tanguy, and B. Ould-Bouamama, "Robust fault detection with interval valued uncertainties in bond graph framework," *Control Engineering Practice*, vol. 71, pp. 61-78, 2018.
- [17] م. م. و. ا. ن. صادقی, "مدلسازی و طراحی سیستم تشخیص عیب برای سوپرهیتر فشارقوی بویلر بازیاب حرارتی یکی از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی کشور مبتنی بر روش باند گراف the," بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق, ۱۳۹۲.
- [18] م. و. س. م. دوازده امامی, "مدلسازی دینامیکی یک شیر کنترل پنوماتیکی با روش باندگراف," شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک, کرمان, دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهید باهنر, ۱۳۸۷.
- [19] A. Mojallal and S. Lotfifard, "Multi-physics graphical model-based fault detection and isolation in wind turbines," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5599-5612, 2017.
- [20] P.-J. Cheng and H.-P. Huang, "Robust fault detection and isolation using bond graph for an active-passive variable serial elastic actuator," *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, vol. 6, no. 2, p. 29, 2015.

- [21] G. Niu, Y. Zhao, and V. T. Tran, "Fault detection and isolation based on bond graph modeling and empirical residual evaluation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229, no. 3, pp. 417-428, 2015.
- [22] M. Ji, Z. Zhang, G. Biswas, and N. Sarkar, "Hybrid fault adaptive control of a wheeled mobile robot," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 226-233, 2003.
- [23] L. A. Wojcik, "Modeling of musculoskeletal structure and function using a modular bond graph approach," *Journal of the franklin Institute*, vol. 340, no. 1, pp. 63-76, 2003.
- [24] P. Gawthrop, "Bond graphs: A representation for mechatronic systems," *Mechatronics*, vol. 1, no. 2, pp. 127-156, 1991.
- [25] T. Bera, A. Samantaray, and R. Karmakar, "Robust overwhelming control of a hydraulically driven three-degrees-of-freedom parallel manipulator through a simplified fast inverse model," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 224, no. 2, pp. 169-184, 2010.
- [26] V. Ragusila and M. R. Emami, "Modelling of a robotic leg using bond graphs," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 40, pp. 132-143, 2014.
- [27] J. J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E*. Pearson Education India, 2009.

## Abstract

In this thesis, fault detection and isolation (FDI) has been discussed for a cable-driven parallel robot. To do so, first the conventional algorithms have been reviewed for FDI and then to test their performance, they have been implemented on a two-Dof robotic manipulator. In the simulation, it is assumed that errors are originated from electrical motors. Therefore, the errors in electrical resistance, damping coefficient of the bearing and also stiffness of the output shaft are considered as the source of error. By defining residuals for each error, we can detect the error and also its source uniquely. By conducting different simulations, it can be proven. Since there is uncertainty in the values of some parameters such as the electrical resistance, to reach better results, the FDI algorithm has been developed by considering uncertainty then implemented on a manipulator. To develop this algorithm, bond graph modeling has been used and the residuals are obtained from this graph

Finally, the bond-graph model of the cable-driven parallel robot is drawn and the proposed FDI algorithm is developed for this robot, in the simulations, only the electrical resistance and damping coefficient of the bearing errors are considered, here the independent residuals are calculated for each error. Obtained results show that the residuals can determine exactly which item is faulty. These errors affected the path of end effector. Also the results shows the effect of the electrical error on the end effector path is trivial in the comparison with other errors.

**Keywords:** cable-driven parallel robot, fault detection and isolation, bond graph modeling,



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering**

**Fault detection and isolation of cable parallel robot using bond graph**

**By:**

**Sajad aidifar**

**Superisor:**

**Dr. Mehdi Bamdad**

**October 2020**