





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

تولید باقیمانده مقاوم جهت آشکارسازی خطا با استفاده از رویکرد فازی برای

سیستم ترمز قطار

دانشجو: احسان پناهی

استاد راهنما

دکتر محمدعلی صدرنیا

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۰۶، ۱۷۵۵
تاریخ: ۱۰، ۱۱، ۹۷

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 خانم / آقای احسان پناهی با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۲۴۴ رشته مهندسی برق گرایش کنترل تحت عنوان: تولید باقیمانده مقاوم جهت آشکارسازی خطا با استفاده از روشگر فازی برای سیستم ترمز قطار که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۰ با حضوریات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه): مقبول مردود
 نوع تحقیق: نظری عملی

عضو	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عنوان داوران
	دانشیار	دکتر امیرنیا	۱- استاد راهنمای اول
_____	_____	_____	۲- استاد راهنمای دوم
_____	_____	_____	۳- اسناد مشاور
	دانشیار	دکتر حمید کاریمفرد	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر فراح	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر رفیعی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد رضا احمدی فرد

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تیمبره: در صورتی که کسی مردود شود حتماً بکار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) نمی تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۲ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.
و به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر
به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار.

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان
است.

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتیم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم
گونه غبار خستگی‌تان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تعهد نامه

اینجانب احسان پناهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " تولید باقیمانده مقاوم جهت آشکارسازی خطا با استفاده از رویتر فازی برای سیستم ترمز قطار" تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمدعلی صدرنیا 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 بوده‌اند 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها 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 نمی‌-

چکیده

هدف از این پایان‌نامه، طراحی یک رویتگر مقاوم آزاد از مدل به منظور آشکارسازی خطا برای سیستم تعلیق و سیستم ترمز قطار مسافربری دیزل الکتریک در حضور اغتشاشات خارجی است. واحد تشخیص خطا بر پایه‌ی رویتگر فازی تاکاگی - سوگنو می‌باشد که علاوه بر تخمین حالت‌های سیستم، خطای سیستم را تشخیص می‌دهد. همچنین سیگنال مانده در برابر خطا و اغتشاش خارجی مقاوم خواهد بود و عملکرد سیستم قابل قبول می‌باشد. پایداری سیستم کلی به منظور تضمین همگرایی خطای تخمین به سمت صفر اثبات می‌شود. جهت نمایش توانایی روش پیشنهادی، رویتگر فازی برای سیستم تعلیق قطار و سیستم ترمز قطار به صورت جداگانه طراحی می‌شود. همچنین یک رویتگر عصبی مبتنی بر روش لیونبرگر به منظور تشخیص خطا برای سیستم ترمز قطار طراحی می‌گردد. مبنای مقایسه رویتگر پیشنهادی با رویتگر عصبی طراحی شده، ساختار آزاد از مدل بودن هر دو روش است که نتایج شبیه‌سازی و آنالیز پایداری صورت گرفته، برتری رویتگر فازی پیشنهادی را در مقایسه با رویتگر عصبی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا، باقیمانده مقاوم، رویتگر فازی، آنالیز پایداری، سیستم ترمز قطار.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه	۱
۱_۱ مقدمه	۲
۱_۱_۱ بوژی	۳
۲_۱_۱ موتور دیزل	۳
۳_۱_۱ مدار انتقال توان	۶
۴_۱_۱ سیستم ترمز	۶
۵_۱_۱ دمنده ها	۱۲
۶_۱_۱ کنترل کننده های الکترونیکی	۱۳
۷_۱_۱ اتاقک کنترل	۱۳
۸_۱_۱ باتری ها	۱۳
۹_۱_۱ مخزن سوخت	۱۳
۱۰_۱_۱ کمپرسور هوا	۱۴
۱۱_۱_۱ ارادیاتور و فن های خنک کننده	۱۴
۱۲_۱_۱ جعبه ی شن	۱۴
۲_۱ مرور تحقیقات و پژوهش های پیشین	۱۵
۱_۲_۱ تحقیقات انجام شده پیرامون تشخیص خطا مبتنی بر منطق فازی	۱۵
۲_۲_۱ تحقیقات انجام شده پیرامون تشخیص خطا برای سیستم تعلیق و ترمز قطار	۱۷
۳_۲_۱ مطالعه آماری پژوهش های انجام شده در حوزه تشخیص خطا	۱۸
فصل ۲ خطا و انواع آن	۲۳

۱_۲	مقدمه	۲۴
۲_۲	دسته‌بندی‌های مختلف ارائه شده از خطا	۲۴
۱_۲_۲	تقسیم بندی خطا بر اساس مشخصه زمانی	۲۵
۲_۲_۲	تقسیم بندی خطا بر اساس مکان وقوع آن	۲۶
۳_۲_۲	تقسیم بندی خطا بر اساس نوع مدل کردن آن	۲۷
۳_۲	تشخیص و جداسازی خطا	۲۷

فصل ۳ طراحی واحد تشخیص خطا

۱_۳	مقدمه	۳۴
۲_۳	رویتگر فازی TSK	۳۴
۳_۳	تولید سیگنال مانده و آنالیز پایداری	۳۵
۴_۳	طراحی رویتگر فازی به منظور تشخیص خطا برای مدل سیستم تعلیق قطار	۳۷
۵_۳	طراحی رویتگر فازی جهت تشخیص خطا برای مدل سیستم ترمز قطار	۴۰

فصل ۴ نتایج شبیه سازی

۱_۴	مقدمه	۴۴
۲_۴	رویتگر فازی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا	۴۶
۳_۴	رویتگر فازی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا	۴۸
۴_۴	رویتگر عصبی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا	۵۰
۵_۴	رویتگر عصبی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا	۵۳
۶_۴	رویتگر فازی برای سیستم تعلیق بدون وجود خطا	۵۶
۷_۴	رویتگر فازی برای سیستم تعلیق با خطای مربعی	۵۸

۸_۴ رویتگر فازی برای سیستم تعلیق با خطای سینوسی..... ۶۰

۹_۴ رویتگر فازی برای سیستم تعلیق با خطای توام مربعی و سینوسی..... ۶۲

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۵

۱_۵ نتیجه گیری..... ۶۶

۲_۵ پیشنهادات ۶۷

پیشنهادات..... ۶۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک سال ۱۹
- شکل (۲-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک نویسنده مقاله ۱۹
- شکل (۳-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک زمینه کاری ۲۰
- شکل (۴-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک نوع مقاله ۲۰
- شکل (۵-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک کشور ۲۱
- شکل (۱-۲) مناطق عملکرد سیستم ۲۴
- شکل (۲-۲) دسته بندی خطا از دیدگاه مشخصه زمانی: ناگهانی (--)، تدریجی (-)، متناوب (-). ۲۶
- شکل (۳-۲) دسته بندی خطا از دیدگاه مدل کردن خطا : خطا جمع شونده و ضرب شونده ۲۷
- شکل (۴-۲) نمایشی از افزونگی ۲۹
- شکل (۵-۲) دسته بندی روش های تشخیص و شناسایی خطا [۳۹] ۳۰
- شکل (۶-۲) دسته بندی واحد تشخیص خطا (FDI) با توجه به وضعیت مدل ۳۱
- شکل (۱-۳) توابع تعلق سیستم فازی برای متغیر سرعت طولی ۳۹
- شکل (۲-۳) توابع تعلق سیستم فازی برای متغیر سرعت ۴۲
- شکل (۱-۴) نیروی وارد شده به لوکوموتیو ۴۶
- شکل (۲-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۴۷
- شکل (۳-۴) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۴۷
- شکل (۴-۴) از بالا به پایین: نیروی وارد شده به لوکوموتیو، خطا و اغتشاش ۴۸
- شکل (۵-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۴۹
- شکل (۶-۴) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۴۹
- شکل (۷-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۵۱
- شکل (۸-۴) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۵۱
- شکل (۹-۴) تخمین دینامیک سیستم ۵۲
- شکل (۱۰-۴) وزن های شبکه ی عصبی ۵۲
- شکل (۱۱-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۵۴

- شکل (۴-۱۲) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۵۴
- شکل (۴-۱۳) تخمین دینامیک سیستم ۵۵
- شکل (۴-۱۴) وزن های شبکه ی عصبی ۵۵
- شکل (۴-۱۵) سیگنال های ورودی به سیستم ۵۶
- شکل (۴-۱۶) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۵۷
- شکل (۴-۱۷) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۵۷
- شکل (۴-۱۸) خطاهای وارد شده به سیستم ۵۸
- شکل (۴-۱۹) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۵۹
- شکل (۴-۲۰) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۵۹
- شکل (۴-۲۱) خطاهای وارد شده به سیستم ۶۰
- شکل (۴-۲۲) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۶۱
- شکل (۴-۲۳) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۶۱
- شکل (۴-۲۴) خطاهای وارد شده به سیستم ۶۲
- شکل (۴-۲۵) متغیرهای حالت و تخمین آن ها ۶۳
- شکل (۴-۲۶) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده ۶۳

فصل ۱

مقدمه

در حال حاضر مباحث تشخیص خطا یکی از موضوعات تحقیقاتی و پژوهشی فعال است که دستاوردهای آن به خصوص در حوزه‌ی صنعت کاربردهای فراوانی دارد. از جمله صنایع و سیستم‌های هدف مقوله‌ی تشخیص خطا، صنایع نظامی، هسته‌ای، سیستم‌های حمل‌ونقل، دستگاه‌های الکتریکی و مکانیکی را می‌توان نام برد. آشکارسازی و تشخیص خطا در این صنایع، یکی از موضوعات بسیار مهم در زمینه کنترل می‌باشد. هنگامی که در یک سیستم خطا رخ می‌دهد موجب خسارات جبران‌ناپذیری از جمله افت عملکرد و یا ناپایداری سیستم می‌شود. بنابراین آشکارسازی و تشخیص به موقع خطا برای عملکرد درست سیستم‌های صنعتی اهمیت بسیار زیادی را دارد.

صنعت حمل و نقل ریلی یکی از مهمترین صنایع کشور و راه‌های ارتباطی انسان به شمار می‌آید. با توجه به اینکه، مسائل حمل و نقل به طور مستقیم با جان بشر در ارتباط هستند، وجود و رخ دادن هرگونه خطا در آن‌ها می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری وارد کند. از این رو تشخیص خطا در این صنعت، دارای جایگاه پراهمیتی می‌باشد. یکی از اجزای مهم حمل و نقل ریلی، لکوموتیو می‌باشد که خرابی آن نقش بسزایی در خرابی قطار و به طور کلی راه‌آهن ریلی ایفا می‌کند. لکوموتیوها از لحاظ سیستم حرکتی، به لکوموتیوهای بخار، برقی، دیزلی، گازسوز، توربینی، هایبرید و برقی-دیزلی تقسیم می‌شوند. لکوموتیو دیزل الکتریک، یکی از پرکاربردترین انواع لکوموتیو در ایران و جهان می‌باشد [۱]. این لکوموتیوها مانند لکوموتیوهای الکتریکی، مجهز به سیستم محرک الکتریکی از نوع موتورهای ترکشن هستند که با کنترلرهای الکترونیکی کنترل می‌شوند و گشتاور حرکتی را برای محورها تامین می‌کنند. بسته به نوع سیستم انتقال قدرت، این نوع لکوموتیوها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) سیستم DC-DC، که در آن ژنراتور DC، ترکشن موتورهای DC را تغذیه می‌نماید.

ب) سیستم AC-DC، که در آن ژنراتور از نوع AC بوده و پس از یکسوسازی جریان متناوب آنها، ترکشن موتورهای DC را تغذیه می‌کنند.

ج) سیستم AC-DC-AC که دارای ژنراتورهای AC بوده و خروجی آن یکسو شده و به جریان مستقیم DC تبدیل می شود. در نهایت با اعمال کنترل های مناسب، دوباره به برق سه فاز AC تبدیل می شود، تا ترکشن موتورهای AC را تغذیه نماید.

در ادامه به بررسی مختصر اجزای مهم موجود در یک لکوموتیو با تمرکز بر سیستم ترمز خواهیم پرداخت.

۱-۱-۱ بوژی

به سیستم حرکتی واگن یا لکوموتیو گفته می شود و متشکل از قاب (تیرهای طولی و عرضی)، مجموع فنربندی (تعلیق)، مجموعه چرخ و محور، مجموعه ترمز و ادوات مربوطه می باشد. بوژی نقش های کلیدی دارد که میتوان به موارد زیر اشاره کرد [۲]:

- توزیع یکنواخت وزن واگن روی خط که گردش واگن هنگام عبور از قوس را تسهیل می نماید
- کشش لکوموتیو و واگن های متصل به آن
- تامین چسبندگی لازم برای لکوموتیو

۱-۱-۲ موتور دیزل

برخلاف موتور بنزینی که از نوع احتراق جرقه ای است، موتور دیزل به وسیله ی حرارت ایجاد شده در اثر تراکم تند و شدید هوا در سیلندر و پاشش سوخت بر روی آن، شکل می گیرد. موتور دیزل، علاوه بر راه اندازی وسایل حمل و نقل، در راه اندازی نیروگاه ها نیز مورد استفاده قرار می گیرد. از طرفی موتور دیزل، منبع اصلی تامین توان برای یک لکوموتیو است و از یک بلوک سیلندر بزرگ که در آن سیلندرهایی به صورت خطی و یا خورجینی قرار گرفته اند، تشکیل شده است. برتری موتور دیزل در برابر موتور بنزینی، ارزش حرارتی بالاتر سوخت در آن است. سوخت موتور دیزل به دلیل نیاز کمتر به پالایش، ارزان تر از بنزین است و قادر به تامین انرژی مناسب، زیر بارهای سنگین در بازه های زمانی

طولانی می‌باشد. موتور دیزل خود از زیرسیستم‌هایی تشکیل می‌شود:

۱- **گاورنر:** کنترل میزان سوخت و دور موتور، به وسیله‌ی سیستمی به نام گاورنر شکل می‌گیرد. گاورنرها معمولاً با کنترل یک دریچه از طریق مکانیزم‌های مختلفی چون، مکانیکی، الکتروپنوماتیک، الکتروهیدرولیک و یا پنوماتیک-هیدرولیک کنترل می‌شوند [۳]. گاورنر، در وضعیت بی‌بار، تضمین‌کننده‌ی دور آرام مناسب و در وضعیت تمام بار، دور مجاز بیشینه را محقق می‌سازد. امروزه در موتورهای مدرن، به جای استفاده از گاورنرهای مکانیکی قدیمی، از سیستم‌های کنترل الکتریکی موتور دیزل استفاده می‌شود.

۲- **پاشش سوخت:** احتراق در یک موتور دیزل به وسیله‌ی تراکم هوای درون سیلندر و افزایش دمای آن و سپس پاشش مناسبی از سوخت در آن منجر به یک انفجار کوتاه می‌شود. این انفجار سبب به پایین راندن سیلندر و در نتیجه، گرداندن میل لنگ می‌شود. به منظور ایجاد پاشش مناسب سوخت، که لازمه‌ی احتراق مناسب و راندمان بالای موتور است، سوخت باید با فشار بالایی به وسیله‌ی انژکتورها به درون سیلندر، پمپ شود. پمپ سوخت به وسیله‌ی یک میل بادامک، که توسط موتور به حرکت درمی‌آید، عمل می‌کند؛ به گونه‌ای که سوخت به یک انژکتور پمپ می‌شود و به وسیله آن، فشار پاششی لازم برای احتراق، ایجاد می‌گردد.

۳- **کنترل سوخت:** در موتورهای بنزینی، توان تولیدی موتور، با استفاده از کنترل مقدار مخلوط سوخت و هوای ورودی به سیلندر کنترل می‌شود بدین گونه که این مخلوط در بیرون سیلندر، در لوله‌های چند راهی ورودی، ایجاد و سپس به وسیله‌ی یک سوپاپ محدودکننده به نام ساسات، به سیلندر اعمال می‌گردد. در یک موتور دیزل، مقدار هوای ورودی به سیلندر ثابت است؛ بنابراین توان موتور، با تغییر مقدار سوخت تحویلی از پمپ سوخت به انژکتورها حاصل می‌شود که با تغییر دبی موثر، پمپ‌های انژکتور تغییر می‌کند. میله‌ی تنظیم سوخت، به وسیله اهرم کنترل توان داخل کابین و یا گاورنر، جابجا می‌شود. راننده برای افزودن توان، به وسیله‌ی اهرم کنترل، میله‌ی تنظیم سوخت را برای قراردادن پیستون‌های پمپ در وضعیتی که بتواند سوخت بیشتری به انژکتورها بدهد، به حرکت

درمی‌آورد. در این حالت سوخت بیشتری به انژکتورها پمپ شده و بنابراین توان موتور، افزایش یافته و گاورنر نیز سرعت موتور را برای اطمینان از عدم افزایش بیش از اندازه‌ی آن کنترل می‌کند [۴].

۴- توربوشارژر: مقدار توانی که از یک سیلندر موتور دیزل به دست می‌آید، به مقدار سوخت سوزانده شده‌ی درون آن بستگی دارد. از سوی دیگر، مقدار سوخت قابل احتراق، به جرم هوای درون سیلندر بستگی دارد. بنابراین اگر هوای بیشتری به سیلندر وارد شود، سوخت بیشتری سوزانده شده و توان بیشتری از احتراق، به دست می‌آید. توربوشارژر به وسیله‌ی گازهای خروجی موتور، به حرکت درآمده و برای افزایش مقدار هوای ورودی به درون سیلندر استفاده می‌شود. این گازها که از فشار و دمای بالایی برخوردارند، موجب چرخش یک توربین شده که آن نیز به صورت هم محور، سبب چرخش یک کمپرسور کوچک شده، و هوای پرفشاری را به درون سیلندر می‌دمد [۵].

۵- کنترل توان: در یک لکوموتیو دیزل الکتریک، وظیفه‌ی تامین گشتاور لازم برای ژنراتور اصلی بر عهده‌ی موتور دیزل است. توان مورد نیاز ژنراتور اصلی، بستگی به توان مورد نیاز ترکشن موتورها دارد. اگر ترکشن موتورها نیاز به توان بیشتری داشته باشند، باید جریان بیشتری را از ژنراتور تامین کنند و این یعنی موتور دیزل باید با سرعت بیشتری کار کند تا قادر به تامین توان لازم باشد. پس برای دستیابی به راندمان بهینه‌ی حرکتی لکوموتیو، دور موتور دیزل باید ارتباط مستقیم با توان مورد نیاز ژنراتور داشته باشد. سرعت لکوموتیو توسط حلقه کنترل توان تنظیم می‌شود. ژنراتورها برای ایجاد بازخورد لازم به منظور کنترل توان موتور دیزل متناسب با توان مورد نیاز خود، به یک سیستم پیچیده‌ی الکترومکانیکی مجهز می‌باشند [۶].

۶- سیستم روغن کاری: موتورهای دیزل نیز مانند موتورهای بنزینی، نیاز به روغن کاری دارند که حتی روان کاری موتورهای دیزل، با توجه به بار و دمای کاری بالاتر آن‌ها در مقایسه با موتورهای بنزینی، از اهمیت بالاتری برخوردار است. در سیستم خنک کننده، روغن روان کار در مسیرهای مربوط، جریان یافته و جداره‌های سیلندرها، یاتاقان‌های میل لنگ و میل بادامک و دیگر اجزای متحرک را، روان کاری می‌کند. روغن موتور در یک مخزن روغن در کف موتور، در فضایی بسته به نام

کارتل روغن، به وسیله‌ی یک پمپ در مدار روغن کاری جریان می‌یابد. به واسطه‌ی جریان روغن در قسمت‌هایی که دمای بالایی دارند، دمای آن افزایش می‌یابد که نیاز به خنک کاری دارد. بنابراین در مدار روغن موتور، از یک مبدل حرارتی ویژه، برای کاهش دمای آن استفاده می‌شود [۱].

۳_۱_۱ مدار انتقال توان

مدار انتقال توان، مدار یا سیستمی است که وظیفه انتقال انرژی تولید شده توسط منبع تولید انرژی را به سیستم محرک جهت اعمال به عملگرها را بر عهده دارد که بسته به محل استفاده، می‌تواند با سیم و یا بدون سیم باشند. همانند خودرو، یک لکوموتیو دیزل الکتریک نیز نمی‌تواند به صورت مستقیم از حالت سکون به حرکت درآید؛ چرا که در دوره‌های پایین موتور، توان حرکتی کافی برای حرکت از وضعیت سکون وجود ندارد. بنابراین یک سیستم انتقال قدرت مناسب، مورد نیاز خواهد بود تا گشتاور مناسبی را برای آغاز حرکت، ایجاد نماید [۷]. در ضمن باید توان وارد شده، بسته به وزن قطار یا شیب خط، تغییر کند. سیستم انتقال توان معمولاً شامل سه زیر سیستم می‌باشد که عبارتند از:

- (۱) ژنراتور سه فاز سنکرون
- (۲) مبدل قدرت با نیمه هادی قدرت یا اینورتر
- (۳) موتور سه فاز القایی (آسنکرون) که در اینجا ترکشن نام دارد.

۴_۱_۱ سیستم ترمز

بر حسب نیازهایی که در طراحی و بهره‌برداری مطرح می‌گردند، در وسایل نقلیه‌ی ریلی، از انواع ترمزها استفاده می‌شود. انتخاب نوع این ترمزها، به فاکتورهای زیر بستگی دارد:

- نیروی ترمزی و وزن وسیله
- میزان ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان
- مسائل اقتصادی ساخت، تعمیر و نگهداری

سیستم ترمزهای متداولی که در راه آهن مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:

- سیستم ترمز هوایی (پنوماتیکی)
- سیستم ترمز مکانیکی
- سیستم ترمز الکتروپنوماتیکی
- سیستم ترمز دینامیکی
- سیستم ترمز مشترک هوا و روغن
- سیستم ترمز الکترونیکی
- سیستم ترمز دیسکی
- سیستم ترمز مغناطیسی
- سیستم ترمز هیدرولیکی

در این قسمت، به توصیف برخی از سیستم‌های ترمزی مهم پرداخته می‌شود:

۱_۱_۴_۱ ترمز هوایی^۱

سیستم ترمز هوایی در وسایل نقلیه ریلی مانند هر وسیله پنوماتیکی دیگری، شامل اجزای تهیه‌ی هوای فشرده، آماده‌سازی، ذخیره‌سازی و اجزای راه‌دهنده و قطع‌کننده مانند شیرها و سوپاپ‌ها می‌باشد، که کاربر آن‌ها بسته به نیازهای هر سیستم تغییر می‌کند. استفاده از هوای فشرده در سیستم ترمز، مزایای بسیاری دارد که برخی از مهمترین آن‌ها عبارتند از [۸]:

- سیال عامل این سیستم هوا می‌باشد که در همه جا به مقدار کافی در دسترس می‌باشد.
- با استفاده از ساده‌ترین روش انتقال یعنی خطوط لوله، می‌توان هوا را از مسیرهای طولانی انتقال داد.

^۱ Air Brake

- استفاده از هوای فشرده همواره متضمن داشتن کمپرسور برای تولید آن نیست بلکه می توان از مخازن هوای فشرده نیز استفاده کرد.
- هوای فشرده ایجاد انفجار و آتش سوزی نمی کند و نیازی به تاسیسات حفاظتی ندارد. همچنین هوای فشرده به صورت کاملا تمیز در سیستم مورد استفاده قرار می گیرد.
- ساختارهای تجهیزات ترمز هوایی ساده بوده و ارزان می باشند. این در حالی است که هوای فشرده خود به تنهایی انرژی گران قیمتی است اما با توجه به ارزان بودن تجهیزات پنوماتیکی و راندمان بالای این سیستم ها، در مقایسه با سیستم های کنترل و راه اندازی، بسیار اقتصادی و مقرون به صرفه می باشد.
- سرعت و نیرو در تجهیزات پنوماتیکی قابل تنظیم می باشد.

فرم ساده ترمز هوایی، سیستم هوای مستقیم نام دارد. در این فرم هوای فشرده به یک پیستون در یک سیلندر فشار وارد می کند. پیستون از طریق اتصالات مکانیکی به لنت های ترمز وصل شده است. لنت ها می توانند روی چرخ های قطار ساییده شوند و از اصطکاک بدست آمده برای کند کردن حرکت قطار استفاده کنند [۳]. اعمال کنترل ترمز، به وسیله اهرم ترمز راننده شکل می گیرد. این اهرم برای تغذیه ی هوای لوله ترمز و همچنین تخلیه ی هوا از لوله ترمز استفاده می شود. مشکل اصلی با سیستم ترمز هوای مستقیم این است که هر نوع جداشدگی بین شلنگ ها و لوله ها سبب کاهش فشار هوا و در نتیجه کاهش نیروی اعمالی به ترمزها میشود. این نقص میتواند به سادگی سبب شود که ترمز قطار خارج از کنترل گردد. ترمزهای هوایی هنوز هم در لکوموتیوها استفاده میشوند؛ البته به عنوان یک سیستم مدار دوگانه و معمولا هر بوژی مدار جداگانه ای برای خود دارد [۹].

با گذشت سال ها و تکمیل تدریجی سیستم ترمز هوایی، در سال ۱۸۶۹، فردی به نام وستینگ هاوس^۱ یک سیستم ترمز عمومی را که ترمز هوایی با کارکرد مستقیم نامیده می شد، طراحی نموده و به مرحله اجرا گذاشت. این ترمز مدل کامل شده ترمز هوای مستقیم رایج می باشد. در این سیستم ترمز، از یک

^۱ Westing house

سوپاپ سه جزئی (شیر سه راهه) که سوپاپ اطمینان نیز نامیده می‌شود، استفاده شده است. در این سیستم، عمل ترمزگیری به وسیله تحریک شیر سه راهه انجام می‌گیرد [۱۰].

قطارها و واگن‌هایی که به لکوموتیو با ترمز هوایی مستقیم مجهز بودند، هوای فشرده جبران‌کننده نداشتند و در نتیجه ترمز هوایی آن‌ها موثر نبود. علاوه بر این، هنگامیکه تعداد واگن‌ها در قطار افزایش می‌یافت، فشار هوایی که در سیلندر ترمز واگن اول به وجود می‌آمد بیش از واگن‌های انتهایی قطار بود و در نتیجه فرآیند ترمزگیری، به شکل نامتوازن و خطرناکی انجام می‌گرفت. در نتیجه وستینگ هاوس بر آن شد که سیستم ترمز مستقیم خود را بهبود بخشد تا بتواند مشکلات مطرح شده را برطرف کند.

گام بعدی در تکمیل سیستم هوایی مستقیم، ترمز هوایی غیرمستقیم یا اتوماتیک است که در سال ۱۸۸۷ وستینگ هاوس آن را اختراع کرد. در ترمز هوایی اتوماتیک، با نصب پشتیبان‌های هوای فشرده در هر واگن، سیلندر ترمز آن حمایت می‌شود. این پشتیبان کمکی هوا، در کنار یک شیرکنترل به نام سوپاپ توزیع قرار می‌گیرد و به وسیله آن، مخزن‌های کمکی هوای ترمز، تغذیه می‌شوند. با این آرایش ادوات ترمزی، هرگاه هوای داخل لوله‌ای که در سراسر قطار وجود دارد به هوای آزاد تخلیه می‌شود، ترمزگیری در قطار به شکل اتوماتیک انجام می‌گیرد. این ویژگی، برای حوادثی چون گسیختگی قطار، به عنوان یک نکته ایمنی محسوب می‌شود. همچنین فشار هوای سیلندرهای ترمز نیز در سراسر قطار متعادل تر می‌شود. مهمترین مزیت این نوع سیستم ترمز، اتوماتیک بودن آن است. همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره شد هنگام گسیختگی قطار، فشار لوله اصلی ترمز کاهش یافته و ترمزها فعال می‌شوند. از آنجایی که فشار لوله اصلی ترمز، به سرعت کاهش پیدا می‌کند، سرعت تکمیل فرآیند ترمزگیری نیز بالاتر خواهد رفت. در این سیستم‌ها نیز عمل ترمزگیری به شکل یکنواخت در طول قطار انجام نمی‌شود، اما اختلاف زمانی در ترمز اتوماتیک در مقایسه با ترمز مستقیم بسیار کمتر است. از معایب این سیستم نیز، می‌توان به وجود لوله‌های زیاد هوا، سروصدای ناشی از تخلیه هوا در کابین لکوموتیو و امکان نشستی زیاد در مدارهای ترمزی اشاره کرد. اخیراً، محققان به دنبال آن هستند که

علاوه بر اتوماتیک بودن، استفاده از فرکانس‌های رادیویی را نیز به سیستم ترمز هوایی بیافزایند که تحقیقاتی هم بر روی آن تاکنون انجام شده است [۱۱].

شارژ مجدد مخزن‌های واگن فقط هنگامی که فشار لوله ترمز بالاتر از فشار مخزن است انجام می‌شود و فشار مخزن واگن فقط تا حد برقراری اعتدال بین فشار مخزن و خط قطار بالا می‌رود. شارژ مجدد مخزن‌های یک قطار می‌تواند زمان زیادی ببرد (هشت یا ده دقیقه در بعضی موارد). اگر لازم باشد که ترمز پیش از اینکه شارژ مجدد تکمیل شود صورت گیرد، به دلیل شروع سیستم از یک نقطه پایین‌تر از حد تعادل (با فشار کلی پایین‌تر) نیاز به کاهش فشار زیادی در لوله ترمز خواهد بود تا به مقدار نیروی ترمزی مطلوب برسد. اگر فشار لوله ترمز در زمان‌های کوتاه متوالی صورت گیرد ممکن است به نقطه‌ای برسد که فشار مخزن واگن با شدت زیاد تخلیه شود و در نتیجه نیروی پیستون سیلندر به طور اساسی کاهش یابد و سبب نقص ترمزها گردد. نتیجه ناخوشایند این امر خارج شدن قطار از کنترل خواهد بود. برای جلوگیری از این امر، می‌توان از ترمز دینامیک (رئوستاتیک) استفاده کرد تا واگن‌ها در کند کردن قطار همکاری نمایند. در اغلب قطارها ترمز ترکیبی (یعنی استفاده همزمان از ترمز قطار و ترمز دینامیک) برای حفظ سرعت مطمئن به کار می‌رود.

۱-۱-۲ ترمز خلا^۱

ترمز خلا، اصلی‌ترین رقیب ترمز هوایی می‌باشد که با فشار منفی کار می‌کند. این ترمز کمی ساده‌تر از ترمز هوایی است زیرا به جای کمپرسور هوا دارای خروجی است که هیچ خروجی مکانیکی یا الکتریکی روی لکوموتیو الکتریکی یا دیزلی ندارد. از آنجا که شلنگ‌های انعطاف پذیر به یک بلوک ثابت متصل هستند، نیازی به شیرهای قطع جریان هوا در انتهای واگن‌ها نیست. از ویژگی‌های بارز این ترمز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

^۱ Vacuum Brake

- در هنگام ترمز گرفتن و خلاص کردن بسیار کند عمل می‌کند.
- یافتن محل نشستی احتمالی در این نوع ترمز دشوار است.
- تعمیر آن بسیار ساده است به گونه‌ای که بستن یک تکه پلاستیک به دور محل نشستی کفایت میکند و خلا موجود در سیستم، پلاستیک را در جای خود محکم می‌کند.

۱_۱_۳ ترمز الکتروپنوماتیک

جدیدترین نوع ترمز، ترمزهای پنوماتیک با کنترل الکترونیکی هستند که در آنها تمام واگن‌ها و لکوموتیوها به وسیله یک شبکه محلی به هم وصل هستند. این سیستم اجازه کنترل مستقل ترمز هر واگن را داده و عملکرد آن را به لکوموتیو اصلی گزارش می‌دهد [۱۰].

در سیستم ترمز پنوماتیک، برای آنکه بتوان لزوماً زمان تخلیه و انتقال هوا به هنگام کنترل پنوماتیکی را حذف و به وسیله‌ی آن، ترمز مورد استفاده در کل قطار را به شکل همزمان، عملی نمود، می‌توان از یک کنترل الکتریکی ترمزهای هوای فشرده استفاده کرد. برای وسیله‌های نقلیه‌ی ریلی، دو نوع سیستم ترمز الکتروپنوماتیک طراحی شده است که شامل ترمز الکتروپنوماتیک مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد. در سیستم ترمز مستقیم، سیلندرهاى ترمز با سوپاپ‌های آزادسازی و ترمزی که به شکل الکتریکی هدایت می‌شوند، به صورت مستقیم، از هوا پر و یا تخلیه می‌گردند. هوای فشرده، به وسیله‌ی مخزن هوای ذخیره یا مخازن ویژه تامین می‌شود. در سیستم ترمز غیر مستقیم، فشار در لوله‌ی اصلی به وسیله‌ی سوپاپ‌های مغناطیسی تغییر می‌یابد، سپس عمل آزادسازی ترمز و سوپاپ‌های توزیع انجام می‌گیرد. برای اینکه بتوان برای آزادسازی، فشار در لوله اصلی را افزایش داد، لوله دوم دیگری که لوله تغذیه لازم می‌گردد، همچنین وسایل نقلیه می‌توانند بدون لوله‌های الکتریکی و تنها با یک لوله‌ی هوا به انتهای قطار اضافه گردند، سپس ترمزهای آن‌ها به شکل عادی به کار می‌افتند.

در خطوط برقی شده، روش های ترمز احیا کننده^۱ در دهه های گذشته به منظور کاهش مصرف انرژی معرفی شده بود. ایجاد موفقیت آمیز ترمز احیاکننده نیازمند استفاده از بانک های مقاومتی به منظور از بین بردن انرژی اضافی یا ایستگاه فرعی وارونگر به منظور تولید مجدد بر روی شبکه توزیع محلی می باشد اما این امکانات با استفاده از لکوموتیو دیزل الکتریک بدست نخواهد آمد. پس باید به دنبال تجهیزات دیگری برای استفاده از این سیستم در لکوموتیو دیزل الکتریک باشیم. خوشبختانه در پیشرفت های اخیر در تجهیزات ذخیره کننده انرژی، تجهیزاتی همچون سوپرکازن ها و چرخ های هرزگرد^۲ ذخیره سازی انرژی را به عنوان یک پیشنهاد قابل اعمال به سیستم های حمل و نقل ریلی و مخصوصا برای واحدهای دیزل الکتریک، مطرح کرده اند [۱۳]، [۱۲].

۵_۱_۱ دمنده ها

در کنار کاربرد اصلی موتور دیزل (به حرکت در آوردن ژنراتور و لکوموتیو)، از توان موتور دیزل، برای به حرکت درآوردن الکتروموتور دمنده ها نیز استفاده می شود. وظیفه ی دمنده، فراهم نمودن جریان هوای لازم برای ترکشن موتورها و خنک کاری آنها در هنگام کارکرد آن می باشد. دمنده ها در درون بدنه ی لکوموتیو و ترکشن موتورها بر روی بوژی، جای می گیرند. بنابراین خروجی دمنده ها باید از راه کانال هایی به ترکشن موتور متصل باشد. در برخی طراحی ها به ازای هر بوژی و ژنراتور، از یک دمنده استفاده می شود. لکوموتیوهای مدرن امروزی از سیستم مدیریت هوای پیشرفته ای بهره می برند که دمای ماشین های دایره ای شکل مختلفی که بر روی آن نصب است را کنترل، و میزان جریان هوا را متناسب با کارکرد آنها، تنظیم می کند [۱].

^۱ Regenerative Braking

^۲ Flywheels

۶-۱-۱ کنترل کننده‌های الکترونیکی

به طور تقریب همه‌ی بخش‌های لکوموتیوهای مدرن امروزی، دارای واحدهای کنترل الکترونیکی است. برای دسترسی بهتر، معمولاً همه‌ی آنها در یک محفظه کنترلی نزدیک کابین راننده، قرار می‌گیرند. این وسایل کنترلی، شامل یک سیستم مدیریت نگهداری هستند، که جابه‌جایی اطلاعات سیر لکوموتیو از آنها به یک کامپیوتر قابل حمل میسر می‌باشد.

۷-۱-۱ اتاقک کنترل

محفظه یا اتاقک کنترل^۱، اصلی‌ترین محل ارتباطی بین ماشین و انسان در لکوموتیو است، که به آن میز کنترل نیز می‌گویند. در مدل آمریکایی، میز کنترل به طور معمول به صورت زاویه دار و در سمت چپ محل جاگیری لکوموتیو ران قرار گرفته است. میز کنترل کاربردهای فراوانی در هدایت و نگهداری لکوموتیوها دارد یعنی به عنوان یک مرکز کنترل برای حرکت قطارها و همچنین مرکزی به منظور مدیریت نگهداری لکوموتیو، توزیع کردن و سوئیچ کردن قطارها، به کار می‌رود [۱۴].

۸-۱-۱ باتری‌ها

درست مانند خودروها، موتور دیزل نیز برای راه‌اندازی، به یک باتری نیاز دارد. همچنین از برق باتری برای چراغ‌ها و نیز کاربردهای کنترلی در هنگام خاموشی موتور و عدم گردش ژنراتور، استفاده می‌شود. در لکوموتیوهای قدیمی از باتری‌های سرب اسیدی، و در مدل‌های مدرن تر از انواع نیکل-کادمیم استفاده می‌شود.

۹-۱-۱ مخزن سوخت

مخزن سوخت، به طور معمول زیر بدنه‌ی لکوموتیو قرار می‌گیرد و ظرفیتی بین ۴۰۰۰ لیتر (در لکوموتیوهای کوچک) تا ۲۲۰۰۰ لیتر (در لکوموتیوهای ۶۰۰۰ اسب بخاری) دارد. علاوه بر سوخت، به

^۱ Control Compartment (cab)

طور معمول مقداری در حدود ۱۰۰۰ لیتر آب برای خنک کاری موتور و ۸۰۰ لیتر روغن را نیز، با خود حمل می‌کند. مخازن هوا نیز برای استفاده ی ترمز قطار و دیگر سیستم های پنوماتیک، در لکوموتیو درج شده اند که به طور معمول در کنار مخزن سوخت در زیر بدنه، جانمایی می‌شوند [۱].

۱-۱-۱۰ کمپرسور هوا

برای ایجاد ذخیره ی ثابتی از هوای فشرده جهت استفاده در سیستم ترمز لکوموتیو و قطار، نیاز به کمپرسور هوا می باشد. در آمریکا شیوه ی رایج برای تامین انرژی دورانی کمپرسور هوا، کوپل کردن آن به میل لنگ موتور است. اما در اروپا بیشتر، کمپرسور به وسیله ی موتورهای برقی، به حرکت درمی آید و بنابراین می تواند در هر قسمتی از لکوموتیو مانند زیربدنه و یا دماغه قرار گیرد [۳].

۱-۱-۱۱ رادیاتور و فن های خنک کننده

رادیاتور یک لکوموتیو دقیقا مانند آنچه بر روی یک خودرو نصب است، کار می‌کند. مایع خنک کننده در پیرامون بلوک سیلندر موتور جریان یافته، تا دمای آن را در سطحی که بیشینه ی بازده موتور به دست می‌آید، نگه دارد. این مایع با گذر از درون رادیاتوری به وسیله ی یک یا چند فن خنک کننده، خنک می‌شود.

۱-۱-۱۲ جعبه ی شن

لکوموتیوها برای تقویت چسبندگی در شرایطی که سطح ریل ها به دلیل رطوبت و آلودگی، لغزنده است، همواره ذخیره ای از شن همراه دارند. این وضعیت به طور معمول در قطارهای چند واحدی (قطارهای خودکشش)، به علت استفاده از چند محور کششی و توزیع نیروی کشش در محورهای واگن ها، بهتر است و در آن ها استفاده از شن، پایین می‌آید. اما در لکوموتیوها، به دلیل تمرکز گشتاور کششی کل قطار در محورهای لکوموتیو، در شرایط کاهش چسبندگی چرخ و ریل، باید از پاشش شن استفاده شود [۹].

۲_۱ مرور تحقیقات و پژوهش‌های پیشین

جهت نمایش اهمیت موضوع حاضر، مرور تحقیقات گذشته را در سه زیر بخش بیان می‌کنیم. نخست بررسی مختصری بر روی پژوهش‌های انجام شده در حوزه تشخیص خطا مبتنی بر منطق فازی داریم. سپس مقالات ارائه شده از تشخیص و شناسایی خطا با تمرکز بر سیستم تعلیق و ترمز قطار بیان می‌شود. در نهایت تقسیم بندی پژوهش‌های انجام شده در حوزه تشخیص خطا با ارائه آمارهای برگرفته از سایت معتبر scopus مطرح خواهد شد.

۱_۲_۱ تحقیقات انجام شده پیرامون تشخیص خطا مبتنی بر منطق فازی

با توجه به مطالعات صورت گرفته، میتوان دریافت که معمولا روش‌های تشخیص و شناسایی خطا بر پایه منطق فازی از رویکردهای معادلات توازن و رویتگر بهره برده اند. در [۱۶]، [۱۵] به بررسی تشخیص خطا در سیستم‌های غیرخطی بر پایه روش معادلات توازن مبتنی بر مدل فازی پرداخته شده است و سیگنال مانده بر اساس مدل فازی محاسبه شده است. در [۱۷] به تشخیص و جداسازی خطا حسگر برای یک سیستم گرمایشی صنعتی بر پایه‌ی مدل‌های تکه‌ای خطی به کمک روش پریتی بر مبنای مدل فازی پرداخته شده است. در [۱۸] جهت تشخیص خطا حسگر در سیستم سه تانک از روش معادلات توازن - فازی استفاده شده است. در [۱۹] با به‌کارگیری مدل درخت فازی، روش پریتی برای تشخیص خطا در سیستم غیرخطی پاندول معکوس بکار گرفته شده است. در این مقاله بهینه‌سازی مسئله به کمک روش LMI انجام گرفته و بردار پریتی در حضور نویز سفید برای محاسبه مانده بدست آمده است. در [۲۰] یک رویتگر مجتمع فازی برای سیستم‌های غیرخطی در حضور اغتشاشات خارجی جهت تشخیص خطا پیشنهاد شده است که آنالیز پایداری روش مذکور بر پایه روش مقاوم L_2 می‌باشد. به منظور طراحی واحد تشخیص خطا برای آشکارسازی خطا حسگر، یک رویتگر فازی نوع دو ارائه شده است. طراحی مذکور برای یک سیستم آشوبی مورد آزمایش واقع شده است [۲۱]. در [۲۲] یک رویتگر فازی TSK برای تشخیص خطای محرک و سنسور برای یک سیستم

غیرخطی گسسته پیشنهاد شده است که مکانیزم روش مذکور بر پایه خطی سازی سیستم غیرخطی می‌باشد. در [۲۳] یک واحد تشخیص و جداسازی خطای مقاوم بر پایه رویکرد فازی مود لغزشی برای سیستم توربین بادی پیشنهاد شده است که با در نظر گرفتن بانکی از مولدهای سیگنال مانده، نوع و محل وقوع خطا تشخیص داده می‌شود. با استفاده از مدل فازی تاکاگی سوگونو و روش سیستم معکوس مقاله [۲۴] به مشکل تخمین خطای محرک برای سیستم‌های غیرخطی پرداخته است. در این تحقیق دو استراتژی تخمین متفاوت پیداده‌سازی شده است: ابتدا سیستم فازی برای توصیف سیستم غیرخطی با خطای محرک طراحی و با استفاده از این سیستم فازی یک روش سیستم معکوس برای تخمین خطای سیستم طراحی شده است. سپس روش دوم تخمین خطا طراحی شده است. در [۲۵] با استفاده از سیستم فازی عصبی تاکاگی سوگونو و تکنیک حالت لغزش، یک روش تشخیص خطای مقاوم برای سیستم‌های غیرخطی‌ای که امکان توصیف با سیستم فازی تاکاگی سوگونو را دارند، طراحی شده است. در این تحقیق از دو مشاهده‌گر فازی عصبی و فازی عصبی سطح لغزش استفاده شده است. در [۲۶] از روش ترکیبی مشاهده‌گر غیرخطی و طراحی فازی، برای تشخیص و جداسازی خطا در چرخ‌های عکس‌العمل ماهواره استفاده شده است. در واقع هدف این تحقیق تشخیص خطای جریان، ولتاژ و یا دمای یکی از سه چرخ عکس‌العمل و همچنین تشخیص محل وقوع خطا است. در [۲۷] آنالیز و طراحی مشاهده‌گر η بر اساس سیستم تشخیص خطا برای فرآیندهای صنعتی غیرخطی زمان‌گسسته انمه گرفته است. برای تشخیص خطا در این تحقیق از سیستم تولید باقیمانده بر اساس مشاهده‌گرهای قطعه‌ای فازی وزن‌دار استفاده شده است. در [۲۸] برای سیستم فازی تاکاگی سوگونو زمان‌گسسته با اختلال و نویز ناشناخته و محدود، یک مشاهده‌گر مبتنی بر تشخیص خطای زنونوپیک در محدوده فرکانسی محدود طراحی شده است. در واقع در این تحقیق محاسبه باقیمانده با روش زنونوپیک انجام می‌شود. در [۲۹] یک روش جدید تخمین مقاوم فازی برای سیستم‌های غیرخطی در حضور توأم خطا و اختلال طراحی شده است. در [۳۰] به مشکل تشخیص خطای ابتدایی برای سیستم‌های فازی تاکاگی سوگونو برای کاربرد در وسیله‌های کشش ریلی سرعت بالا می‌پردازد.

۲_۲_۱ تحقیقات انجام شده پیرامون تشخیص خطا برای سیستم تعلیق و ترمز قطار

مساله تشخیص خطا به منظور ارتقای ایمنی و راحتی، دستیابی به عملکرد بهتر و کاهش هزینه‌های نگهداری در سیستم حمل و نقل ریلی از اهمیت بالایی برخوردار است بطوریکه در دو دهه اخیر توجه قابل قبولی معطوف این مساله گردیده است. روش‌های متعددی که بر پایه آلتراسونیک، فراصدهای الکترومغناطیس و هشداردهنده‌های آکوستیک هستند، جهت تشخیص و جداسازی خطا^۱ در چرخ‌ها، محورها و بول برینگ‌های قطار بکار گرفته شده‌اند [۳۳]-[۳۱]. این در حالیست که در حوزه تشخیص خطا در سیستم تعلیق قطار بصورت محدود کار شده است. در [۳۴]، از روش فیلتر کالمن جهت تخمین حالت‌ها و تشخیص و جداسازی خطا در سیستم تعلیق قطار استفاده شده است. در این تحقیق، دمپرهای طولی، عرضی و عمودی سیستم دچار خطا شده‌اند. همچنین حسگرهای شتاب، داده‌های لازم جهت تخمین حالت را برای فیلترهای تعبیه شده فراهم می‌کنند. در [۳۵]، طراحی FDI برای سیستم تعلیق غیرخطی قطار مورد مطالعه قرار گرفته شده است. طراحی در دو مرحله صورت می‌گیرد؛ در گام نخست طراحی روی‌تگر بهینه مقاوم و در گام دوم، تشخیص خطا بوسیله‌ی تولید سیگنال مانده انجام می‌شود. در [۳۶] تشخیص خطا در سیستم تعلیق قطار بر پایه مشتق‌گیر ردگیری بهینه شده انجام می‌گیرد. مکانیزم طراحی بر پایه اصلاح نواقص موجود در مشتق‌گیر ردگیری برای دستیابی به تقریب مطلوب می‌باشد.

در [۳۷] از الگوریتم چند مدله دارای تداخل^۲ جهت تشخیص خطا در سیستم تعلیق قطار استفاده شده است. در روند طراحی، تخمین حالت‌های سیستم توسط فیلتر کالمن انجام می‌شود. عمل جداسازی خطا در [۳۸] بر پایه‌ی تئوری دمپستر - شافر^۳ برای سیستم تعلیق قطار صورت گرفته است. این تئوری مبتنی بر آنالیز مقادیر استثنایی سیستم عمل می‌کند. در [۳۹]، از روی‌تگر حالت

^۱ Fault Detection and Isolation (FDI)

^۲ Interacting Multiple-model Algorithm (IMM)

^۳ Dempster-Shafer (D-S)

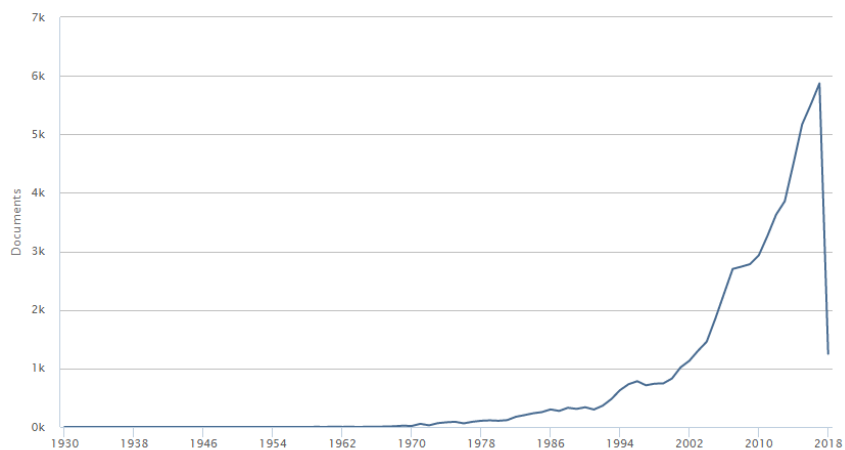
جهت تشخیص خطا در سیستم تعلیق قطار استفاده می‌شود. در این پژوهش به خطاهای کوچکی که آستانه‌های تعریف شده برای سیگنال مانده نسبت به آنها حساس نیستند، توجه شده است و با طراحی یک فیلتر مبتنی بر روش نامساوی ماتریس خطی^۱، سیگنال مانده نسبت به اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری مقاوم ولی نسبت به وقوع خطا حساس عمل می‌کند. در [۴۰]، طراحی رویتگر به منظور تشخیص خطا و طراحی کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی جهت تحمل پذیر شدن خطا برای سیستم تعلیق قطار پیشنهاد شده و پایداری سیستم در حضور اغتشاشات خارجی و خطا محرکه اثبات گردیده است. در [۴۱] تشخیص خطای سیستم تعلیق قطار توسط اصل آنالیز اجزای همگرا^۲ صورت گرفته است. در این پژوهش دو خطای دمپر و فنر در نظر گرفته شد.

۳_۲_۱ مطالعه آماری پژوهش‌های انجام شده در حوزه تشخیص خطا

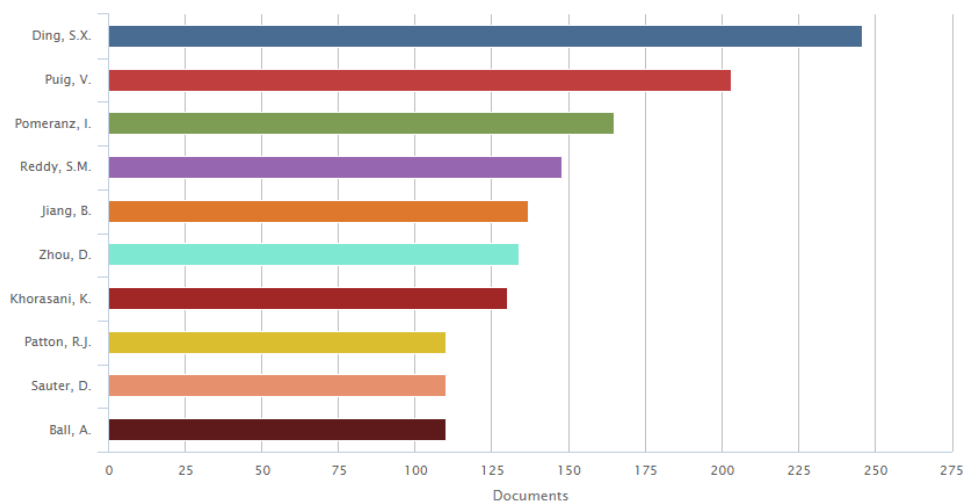
برای مشخص شدن اهمیت موضوع شناسایی و تشخیص خطا به بررسی مقالات ارائه شده در این زمینه در سال‌های اخیر می‌پردازیم. در شکل ۱-۱ تعداد این مقالات در سال‌های اخیر مشخص شده است. همچنین در شکل ۲-۱ تعداد این مقالات به تفکیک نویسندگان مقاله، در شکل ۳-۱ به تفکیک زمینه کاری، در شکل ۴-۱ به تفکیک نوع مقاله و شکل ۵-۱ به تفکیک کشور مشخص شده است. لازم به ذکر است این دسته‌بندی بر اساس سایت scopus انجام گرفته است.

^۱ Linear Matrix Inequality (LMI)

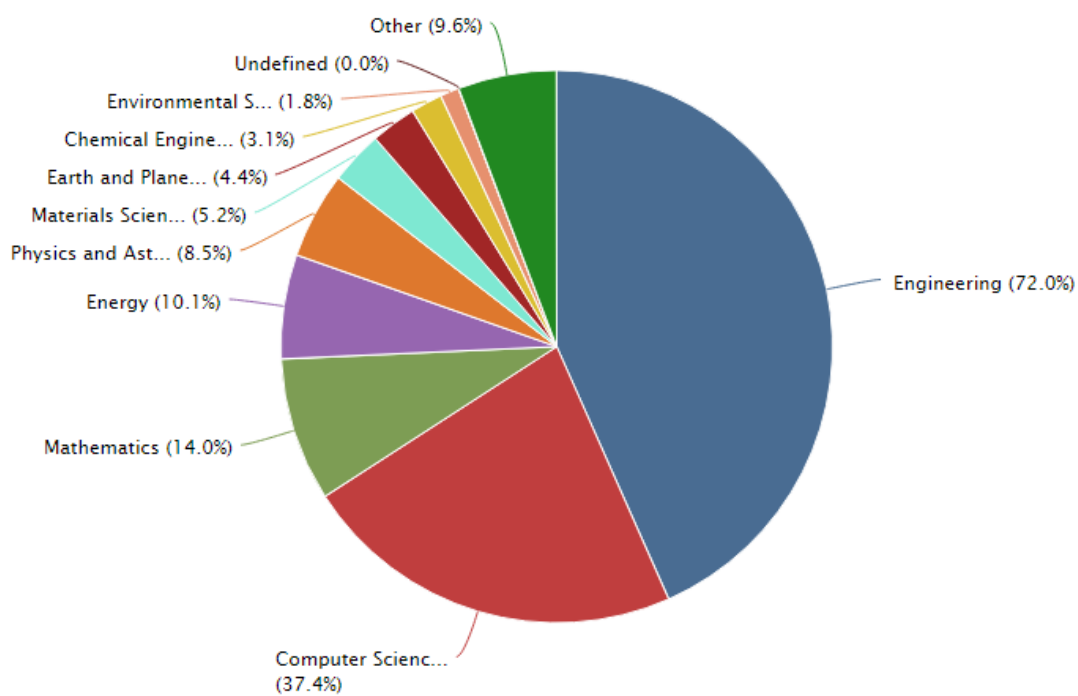
^۲ Consensus Principle Components Analysis (CPCA)



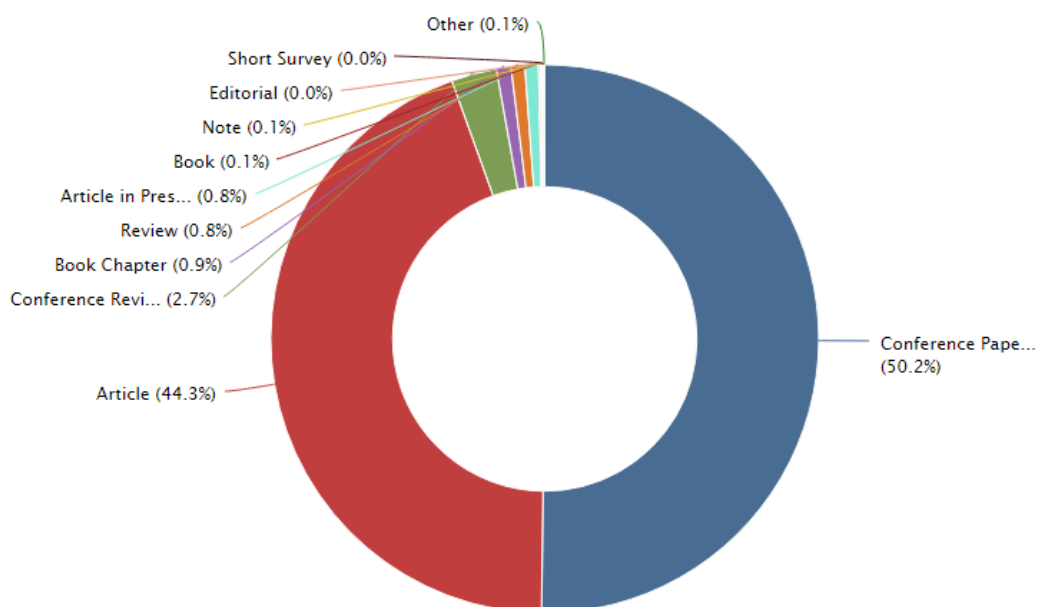
شکل (۱-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک سال



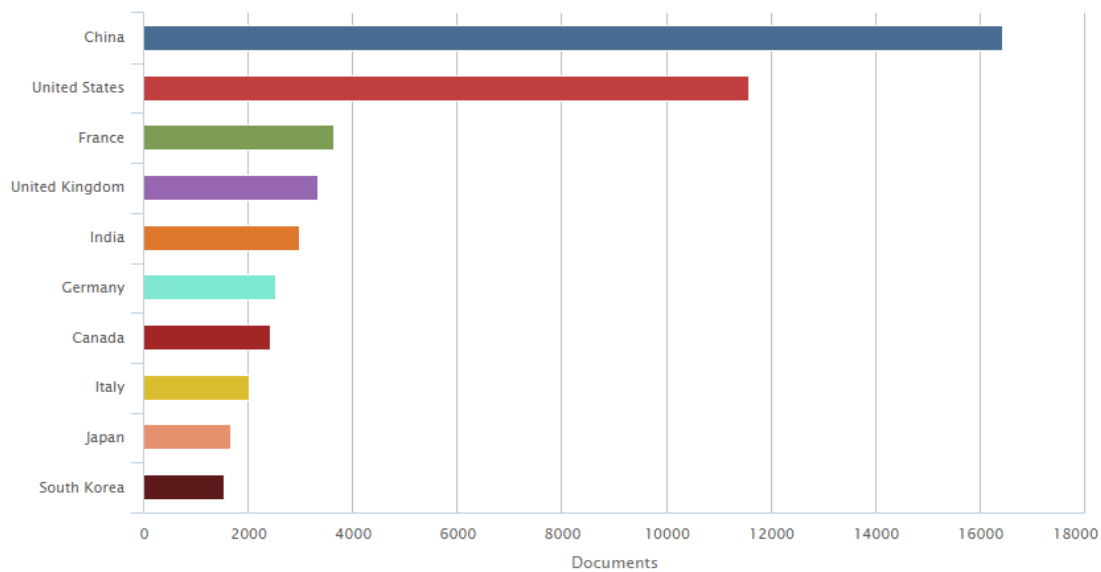
شکل (۲-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک نویسنده مقاله



شکل (۳-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک زمینه کاری



شکل (۴-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک نوع مقاله



شکل (۵-۱) تعداد مقالات به چاپ رسیده در زمینه تشخیص و شناسایی خطا به تفکیک کشور

لذا با توجه به مطالعات صورت گرفته، بررسی مقالات و آمارهای مستخرج، یک واحد تشخیص خطای مقاوم برای سیستم تعلیق (ترمز) قطار با بکارگیری رویتنگر فازی TSK طراحی خواهد شد که توانایی دفع اثر اغتشاشات خارجی را نیز داشته باشد.

فصل ۲ خطا و انواع آن

هر تغییر غیرمنتظره‌ای که عملکرد و بازده کلی سیستم را کاهش دهد، یک خطا تلقی می‌شود. بر خلاف خرابی که منجر به فروپاشی و توقف کامل سیستم می‌شود، خطا به وجود نقصی در سیستم اشاره می‌کند. فضای کاری سیستم را می‌توان به ۴ بخش که شامل منطقه‌ای با بازدهی قابل قبول، منطقه‌ای با بازدهی پایین، منطقه‌ای با بازدهی غیرقابل قبول و منطقه‌ی خطر تقسیم کرد. شکل ذیل بیانگر این نواحی می‌باشد [۴۲]:



شکل (۱-۲) مناطق عملکرد سیستم

از نظر عملی، خطا یابی کامل در سه مرحله صورت می‌گیرد:

الف) تولید مانده: اختلاف سیگنال خروجی سیستم و سیگنال خروجی تخمین زده شده مولد سیگنال مانده خواهد بود.

ب) ارزیابی مانده: در این مرحله، زمان و محل وقوع خطا مشخص می‌گردد.

ج) شناسایی خطا: نوع، اندازه و دلیل وقوع خطا در این مرحله تعیین می‌شود.

۲_۲ دسته‌بندی‌های مختلف ارائه شده از خطا

اصولاً خطا از جهات مختلف قابل دسته‌بندی می‌باشد که در اینجا به آنها اشاره می‌کنیم.

۱_۲_۲ تقسیم بندی خطا بر اساس مشخصه زمانی

بر اساس مشخصه زمانی می توان خطاها را دسته بندی کرد که به سه دسته ناگهانی^۱، نرم^۲ و متناوب^۳ دسته بندی می شوند. شکل (۲-۲) رفتار این دسته از خطاها را نشان می دهد [۴۳].

الف) خطا ناگهانی: باعث رخ دادن تغییرات ناگهانی و ناخواسته می شود که عموماً به راحتی قابل تشخیص می باشند. خطاهای ناگهانی اغلب در اثر معیوب شدن سخت افزار به وجود می آید این نوع خطا بسیار شدید بوده و بر عملکرد سیستم و پایداری آن تاثیر مستقیم دارد لذا نیاز به اصلاح فوری دارد.

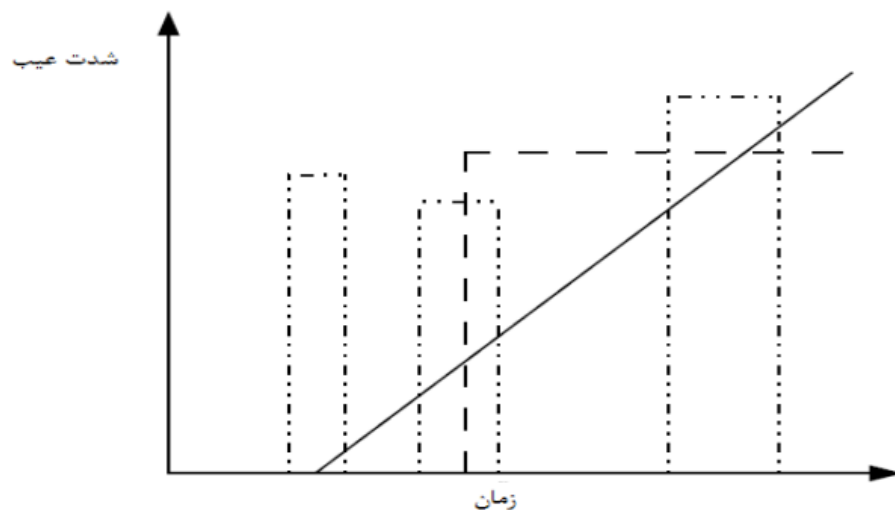
ب) خطا تدریجی: خطاهای اولیه ای که در سیستم رخ می دهند و تغییرات آرامی دارند و به صورت واضح و آشکار دیده نمی شوند. هرچند این نوع خطا تأثیر آنی زیادی ندارد ولی به هر حال اگر این خطا هم به مدت زمان طولانی نادیده گرفته شود باعث آسیب های بعدی می شود. خطاهای نرم بیانگر تغییرات پارامتری کندی بوده که در اثر کهنه شدن سیستم رخ می دهد این نوع خطا صدمه ناگهانی ایجاد نمی کند ولی شناسایی آن مشکل می باشد.

ج) خطا متناوب: خطاهایی هستند که بطور متناوب در سیستم رخ می دهند و ممکن است لحظه ای در سیستم باشند و لحظه ای قطع شوند. خطاهای متناوب شامل خطاهایی می باشد که به صورت مقطعی ظاهر شده و سپس ناپدید می گردد.

^۱ Abrupt Fault

^۲ Incipient Fault

^۳ Intermittent Fault



شکل (۲-۲) دسته بندی خطا از دیدگاه مشخصه زمانی: ناگهانی (--)، تدریجی (-)، متناوب (..-)

۲_۲_۲ تقسیم بندی خطا بر اساس مکان وقوع آن

از آنجایی که سیستم را میتوان به سه بخش محرک، حسگر و فرآیند تقسیم کرد لذا عیوب را نیز می توان با توجه به وقوع در این سه مکان تقسیم بندی کرد:

الف) خطا محرک^۱: هرگونه نقصی در تجهیزات محرک را میتوان در این گروه در نظر گرفت. این عیوب مشخصات سیستم را تغییر نمی دهد ولی کارایی محرک را کاهش می دهد.

ب) خطا حسگر^۲: در این نوع خطا، حسگر اطلاعات نادرستی از فرایند را به کنترل کننده جهت تصمیم گیری می فرستد. در مواردی که استفاده از حسگر از لحاظ ابعاد و قیمت محدودیت نداشته باشد، می توان با استفاده از حسگرهای اضافی ایمنی سیستم را بالا برد که این مبحث در قسمت افزونگی توضیح داده شده است.

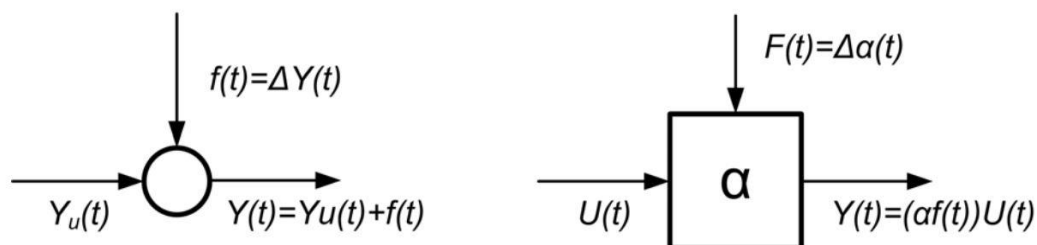
^۱ Actuators Fault

^۲ Sensors Fault

ج) خطا فرآیند^۱: این نوع خطا در اجزای خود سیستم رخ می‌دهد و تمامی خطاهایی که نتوان آن‌ها را در دو دسته قبلی جای داد در این دسته قرار می‌گیرند. این نوع خطا بیانگر تغییر در پارامترهای فیزیکی سیستم می‌باشد.

۳_۲_۲ تقسیم بندی خطا بر اساس نوع مدل کردن آن

از دیدگاه دیگر و بسته به مدل کردن خطا در سیستم، خطاها به دو دسته ضرب شونده و جمع شونده تقسیم می‌شوند که این نکته در شکل (۲-۳) نشان داده شده است [۴۴].



شکل (۳-۲) دسته بندی خطا از دیدگاه مدل کردن خطا: خطا جمع شونده و ضرب شونده

۳_۲ تشخیص و جداسازی خطا

واحد FDI نقش حیاتی و مهمی را در رابطه با فراهم کردن اطلاعات خطاها و خرابی‌ها در سیستم ایفا می‌کند. مهمترین نقش FDI تشخیص خطا و محل آن می‌باشد کمیته فنی IFAC تعاریف زیر را ارائه داده است [۴۵].

- آشکارسازی خطا^۲: تشخیص وقوع خطا در سیستم.
- جداسازی خطا^۳: تعیین مکان وقوع خطا در سیستم
- شناسایی خطا^۴: تعیین نوع، اندازه، مکان و زمان وقوع خطا در سیستم

^۱ Component Fault

^۲ Fault Detection

^۳ Fault Isolation

^۴ Fault Diagnosis

هر یک از مراحل ذکرشده‌ی بالا کاربرد خاص خود را دارد. عمل آشکارسازی و جداسازی برای سیستم‌های عملی بسیار مهم و حیاتی است. به عبارتی بایستی بتوان رخ دادن خطا در فرایند را تشخیص داد و تفاوت آن را با مسائلی همچون، اغتشاش، نامعینی و نویز مشخص کرد. چراکه تمامی فرایندها همواره تحت تأثیر اغتشاشات و نویز هستند. در حالت کلی کنترل‌کننده‌های که برای فرایند طراحی می‌گردد بایستی بتواند تأثیر اغتشاش و نویز را در خروجی فرایند به حداقل برساند. اما خطا رخداد نامعلومی است که باید حضور آن در فرایند تشخیص داده شده و هر چه سریعتر رفع گردد. در حالت کلی روش‌های تشخیص خطا به چهار دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

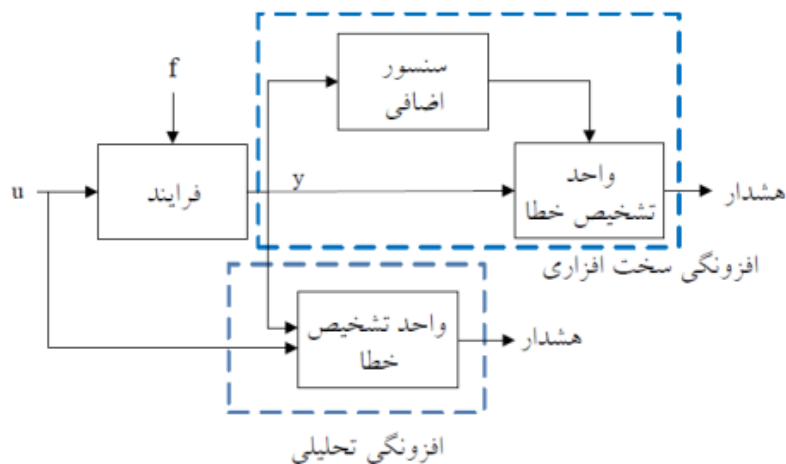
الف) روش‌های زیستی

ب) افزونگی سخت افزاری

ج) روش پردازش سیگنال

د) افزونگی نرم افزاری (بر پایه مدل - بر پایه داده)

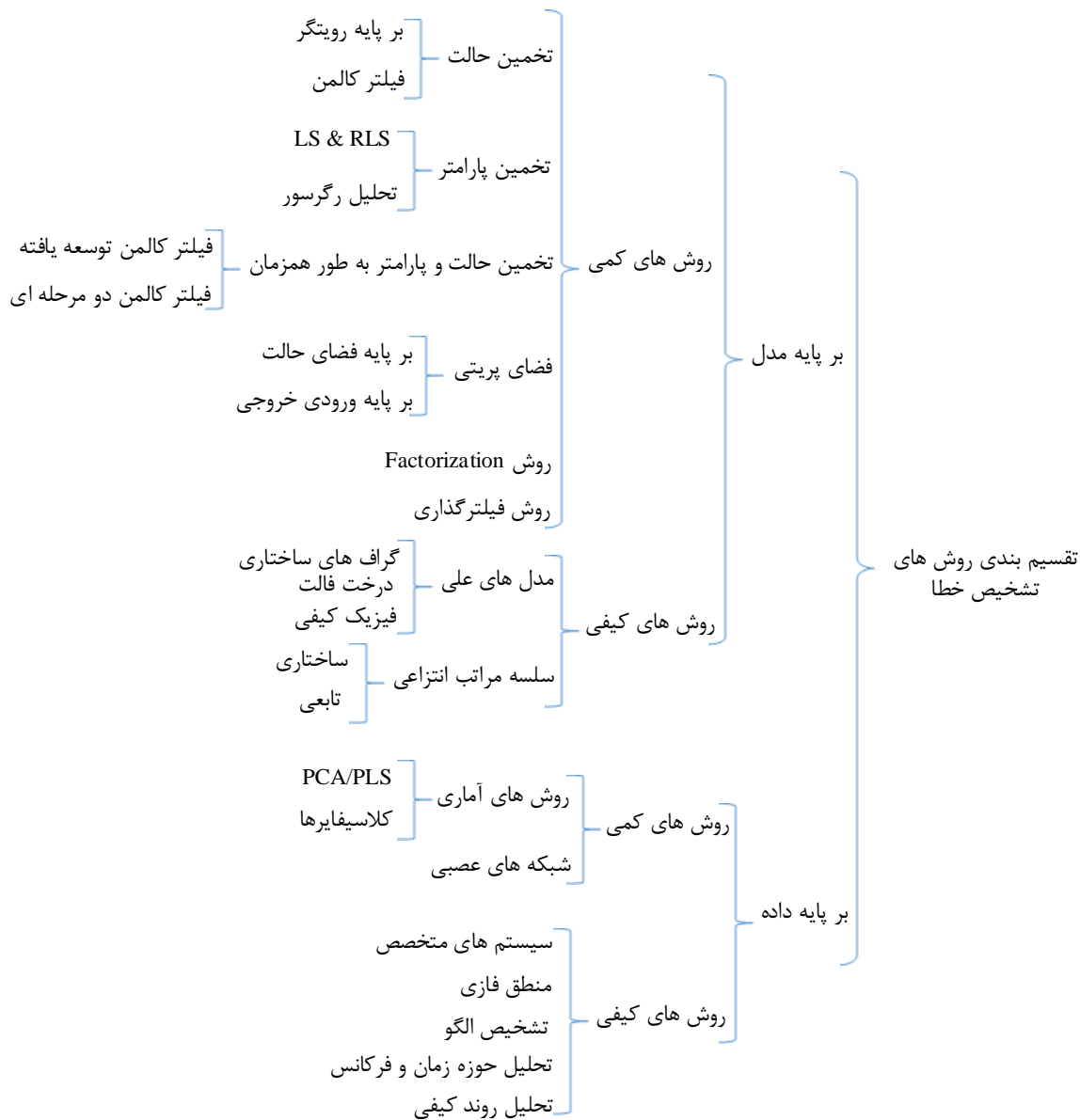
در روش افزونگی سخت افزاری با اضافه کردن تعدادی حسگر، محرک و زیرسیستم، بخش‌هایی که مستعد رخدادن خطا هستند پشتیبانی می‌شوند. به این ترتیب هنگام بروز خطا در هر یک از اجزا افزونه‌ی آن وارد سیستم می‌شود و قسمت آسیب دیده از مدار خارج می‌گردد. مشکل اساسی در این روش افزایش چشمگیر هزینه‌ها و فضای اضافی است که برای این طرح سخت افزاری بایستی تعلق گیرد. جهت کاهش هزینه‌ها از مدل فرایند به جای خود فرایند در تحلیل‌ها استفاده می‌شود که این همان مفهوم افزونگی نرم‌افزاری است. شکل ۲-۴ نمایشی از افزونگی نرم‌افزاری و سخت‌افزاری را نشان می‌دهد. در این شکل حسگر افزوده شده در بخش افزونگی سخت‌افزاری قرار داده شده است و به محض رخ دادن خطا در حسگر، سیستم تشخیص خطا وجود خطا را با اعلام هشدار نشان می‌دهد. اما در قسمت افزونگی نرم‌افزاری مدل فرایند به موازات خود فرایند عمل می‌کند. در زمانی که خطای در فرایند رخ نداده باشد متغیرهای تخمین زده شده همانند متغیرهای اندازه‌گیری شده از فرایند خواهند بود، اما هنگامی که خطای در سیستم رخ دهد این مقادیر متفاوت از یکدیگر خواهند شد.



شکل (۲-۴) نمایشی از افزونگی

روش‌هایی که از افزونگی نرم‌افزاری منشعب می‌شوند، بسیار گسترده بوده و در دهه‌های اخیر توسعه چشمگیری پیدا کرده‌اند. نمودار صفحه بعد گستردگی این روش‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. این روش‌ها به دو دسته کلی مبتنی بر داده و مبتنی بر مدل تقسیم‌بندی می‌شوند، که هر کدام از آن‌ها دارای زیرشاخه‌های متعددی می‌باشند.

از اوایل دهه‌ی ۷۰ میلادی روش‌های مبتنی بر مدل برای تشخیص خطا مورد توجه قرار گرفته‌اند. در روش‌های بر پایه مدل، تشخیص خطا بر اساس سیگنالی به نام سیگنال مانده صورت می‌گیرد. در این روش همواره سیگنال مورد نظر با یک مقدار آستانه (کران بالا و کران پایین) مقایسه می‌شود. اگر مقدار سیگنال یادشده از حد آستانه بیشتر شود سیستم تشخیص خطا فعال شده و اعلام خطر می‌کند. سیستم‌های تشخیص خطا که به این روش طراحی می‌شوند ممکن است در اثر نویز، تغییرات ورودی و یا تغییر نقطه کار دچار اشتباه شوند و بروز خطا را در فرایند نشان دهند درحالی‌که خطای رخ نداده است. از سوی دیگر، رخداد یک خطا در فرآیند ممکن است سیگنال‌های متعددی را از مقدار آستانه‌ی خود فراتر برده و این‌گونه به نظر برسد که چندین خطا رخ داده است. در نتیجه جداسازی خطا کار دشواری می‌گردد.

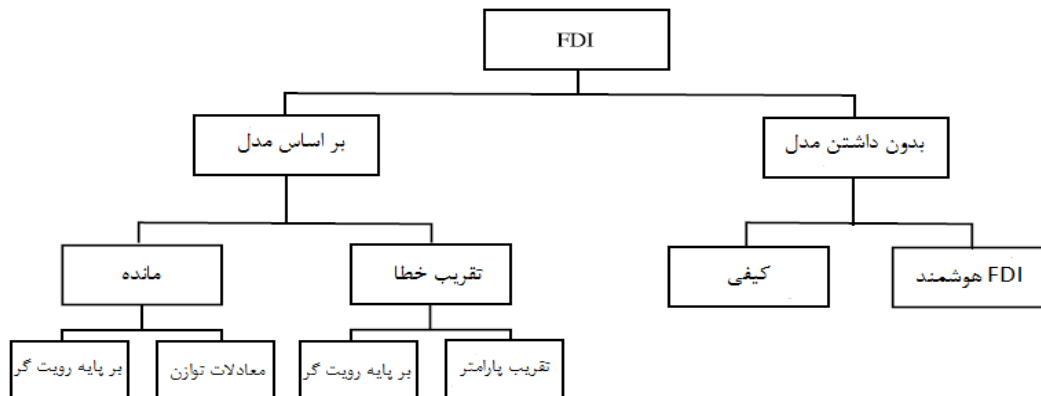


شکل (۲-۵) دسته بندی روش های تشخیص و شناسایی خطا [۴۶]

در حالت کلی روش های مبتنی بر مدل نیز مناسب سیستم هایی هستند که مدل آن ها در دسترس باشد. از آنجایی که این روش ها از مدل ریاضی سیستم استفاده می کنند تا حالت و پارامترهای سیستم را تخمین بزنند، در کل این روش ها برای سیستم های با ابعاد کوچک مناسب هستند. از سوی دیگر در فرایندهای صنعتی عدم قطعیت های بسیاری در مدل فرایند وجود دارند و ساختار غیرخطی یا متغیر با زمان این فرایندها و اثرات کوپلینگ قوی بین متغیرها مانع بیان یک مدل دقیق برای فرایند و بکار

بردن روش‌های تشخیصی خطا بر مبنای مدل می‌گردد.

نکته قابل توجه در طراحی واحد تشخیص و جداسازی خطا، بررسی وضعیت مدل است. به این مفهوم که متناسب با فراهم بودن یا نبودن مدل، طراحی واحد تشخیص خطا متفاوت خواهد بود. نمودار ذیل تقسیم بندی مختصری از بیان مذکور را ارائه می‌دهد.



شکل (۲-۶) دسته بندی واحد تشخیص خطا (FDI) با توجه به وضعیت مدل

در FDI بر اساس مدل با زیرشاخه‌ی مانده، سیگنال‌هایی که از مدل ریاضی و اندازه‌گیری سخت افزاری بدست می‌آیند با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۴۷]. در شرایط رخداد خطا، مانده می‌بایست صفر باشد و در زمان رخداد خطا و یا خرابی مانده غیر صفر می‌باشد. سیگنال مانده معمولاً همراه با یک حد آستانه‌ای در نظر گرفته می‌شود تا با اغتشاشات و نامعینی‌ها اشتباه نشود. وقتی که سیگنال مانده از حد آستانه تجاوز کند می‌گویند خطای رخ داده است. معمولاً در تولید مانده، خطا و مکان آن تشخیص داده می‌شود و اطلاعات دیگری در مورد خطا وجود ندارد. سیستم‌های FDI بر اساس مانده قابلیت فهم آسانی دارند و در بسیاری از روش‌ها به راحتی قابل استفاده می‌باشند. در زیرشاخه‌ی تخمین خطا، یکی از بهترین روش‌ها استفاده از فیلتر کالمن می‌باشد.

خطاهای ناشی از مدل‌های ناکامل یا غیر دقیق بر ساختار عملکرد تشخیص خطا تاثیر گذار می‌باشند [۴۸]. از اوایل سال ۲۰۰۰ تحقیقات بر روی FDI بدون نیاز به مدل بیشتر شده است. بیشتر این تحقیقات بر پایه‌ی هوش مصنوعی و محاسبات نرم می‌باشد همانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی

[۴۹]. یکی از مزایای استفاده از رویکرد هوشمند برای FDI توانایی مدل کردن هر تابع غیر خطی می باشد [۵۰]. همچنین آموزش از طریق نمونه‌ها نیاز به اطلاعات پیشین یا ندارد و یا بسیار کم دارد. یکی از محبوبترین روش‌های تشخیص خطا، استفاده از رویتگرها می باشد که این رویتگرها می‌توانند انواع مختلف و متنوعی داشته باشند، برای مثال میتوان به رویتگرهای ورودی ناشناخته، رویتگر مد لغزشی، رویتگر تطبیقی، رویتگر با بهره بالا اشاره نمود.

روش رویتگر حالت رویکردی است که بر اساس این فرض بنا شده است که خطاها در حالت‌های سیستم نمود پیدا می‌کنند. روش کار به این صورت است که حالت‌های سیستم واقعی بدون خطا را به صورت آنلاین به کمک روش‌های رویتگر حالت، تخمین می‌زنند. هر تغییری در حالت‌های سیستم منجر به انحراف بین حالت‌های سیستم و تخمین‌های آن‌ها خواهد شد.

با توجه به اینکه رویتگرها به مدل دقیق سیستم نیاز دارند و به این علت که این مدل در دسترس نیست طراحی رویتگرهای مقاوم مبتنی بر منطق فازی برای تشخیص خطا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۵۱].

در مقابل روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌های مبتنی بر داده برای تشخیص خطا و همچنین طراحی کنترل‌کننده ارائه می‌شوند. عموماً روش‌های مبتنی بر داده مناسب سیستم‌هایی هستند که اطلاعات کافی از مدل ریاضیاتی آن‌ها در اختیار نمی‌باشد و یا این که استخراج مدل ریاضیاتی آن‌ها بسیار دشوار می‌باشد. بدین مفهوم که به‌طور مستقیم با استفاده از داده‌ها، خطا شناسایی شده و سپس کنترل‌کننده برای عملکرد با ضریب امنیت بالا برای فرایند طراحی می‌شود. عموماً این روش‌ها با داده‌های با ابعاد بالا سروکار دارند و روش‌های کاهش داده عموماً برای پررنگ کردن اطلاعات مهم داده‌ها بکار می‌روند. کنترل‌کننده طراحی شده بر مبنای داده اطلاعات کافی برای بیان اثرات اغتشاش و دینامیک مدل در هر لحظه را داراست که این قابلیت تطبیق باعث افزایش عملکرد کنترلی می‌گردد.

فصل ۳

طراحی واحد تشخیص خطا

هدف از این بخش، طراحی یک روبتگر فازی TSK به منظور تشخیص خطای وارده در سیستم تعلیق و ترمز قطار می‌باشد. انگیزه اصلی در استفاده از مدل سازی فازی، رسیدن به مدلی ساده‌تر با اثر تداخل کمتر بین دینامیک‌های آن است به گونه‌ای که رفتار سیستم غیرخطی توسط مدل فازی تخمین زده شود. لازم به ذکر است که اگر سیستم اصلی را با توجه به نقاط کار آن به چند سیستم مجزا تقسیم کرده به نحوی که توسط این چند سیستم، کل محدوده کاری سیستم اصلی پوشش داده شود و سپس به کمک مدل فازی TSK تقریبی یکپارچه از آن زده شود، هدف ما در رسیدن به مدلی آسان‌تر محقق شده است.

۲_۳ روبتگر فازی TSK

در اینجا با استفاده از مدل دینامیکی فازی TSK، نمایشی از سیستم غیرخطی مورد مطالعه با ورودی‌های نامعلوم را که شامل توابع تعلق فازی است، ارائه خواهیم داد [۵۲]:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi)(A_i x + B_i u + R_i \bar{u} + D_i) \quad (1-3)$$

$$y = Cx$$

که بردار حالت، u بردار ورودی، \bar{u} بردار ورودی‌های نامعلوم و D_i بیانگر نقطه کار سیستم می‌باشد. ساختار پیشنهادی روبتگر فازی بصورت زیر می‌باشد:

$$\hat{\dot{x}} = \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi)(A_i \hat{x} + B_i u + D_i + G_i(y - C\hat{x}) + R_i \hat{u}_i) \quad (2-3)$$

$$\hat{u}_i = \gamma W_i(y - C\hat{x})$$

$$\hat{u} = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) \hat{u}_i$$

هدف از طراحی، تعیین ماتریس بهره G_i و مقدار اسکالر γ است به قسمی که همگرایی مجانبی خطای

تخمین به سمت صفر محقق شود.

با توجه به این که طراحی رویتر برای یک سیستم پایدار با ورودی‌های محدود انجام می‌شود می‌توانیم فرض زیر را داشته باشیم:

$$\|\bar{u}\| \leq \rho \quad (3-3)$$

که ρ مقدار مثبتی دارد.

۳_۳ تولید سیگنال مانده و آنالیز پایداری

سیگنال مانده بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$r = y - \hat{y} = Ce = C(x - \hat{x}) \quad (4-3)$$

مشتق خطای تخمین بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) ((A_i - G_i C)e + R_i \bar{u} - R_i \hat{u}_i) \quad (5-3)$$

با جایگذاری از رابطه (۳-۲)، داریم:

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) ((A_i - G_i C)e + R_i \bar{u} - R_i \gamma W_i C e) \quad (6-3)$$

اثبات می‌شود که خطای تخمین حالت به صفر همگرا می‌شود اگر ماتریس‌های مثبت معین Q, P و

ماتریس‌های G_i, W_i دو شرط زیر را محقق سازند:

$$(A_i - G_i C)^T P + P(A_i - G_i C) < -Q \quad (7-3)$$

$$W_i C = R_i^T P$$

و شرط ذیل برای اسکالر γ بدست خواهد آمد:

$$\gamma \geq 0.5 (\lambda_{\min}(P^{-1}Q) \lambda_{\min}(P) \epsilon^2)^{-1} \rho^2 \quad (8-3)$$

که مقدار ρ طبق فرض در نظر گرفته شده تعیین می‌شود.

اثبات) تابع لیپانوف بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = e^T P e \quad (9-3)$$

مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) (e^T (A_i - G_i C)^T P + P (A_i - G_i C) e + \gamma e^T P R_i \bar{u} \\ &\quad - \gamma e^T P R_i W_i C e) \quad (10-3) \\ &\leq \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) (e^T (A_i - G_i C)^T P + P (A_i - G_i C) e + \gamma \rho \| (P R_i)^T e \| \\ &\quad - \gamma e^T P R_i R_i^T P e) \end{aligned}$$

برای هر مقدار اسکالر مثبت β ، داریم:

$$(\beta + \rho \| (P R_i)^T e(t) \|^{\gamma})^{\gamma} \geq \cdot \quad (11-3)$$

$$\gamma \beta \rho \| (P R_i)^T e(t) \| \leq \rho^{\gamma} \| (P R_i)^T e(t) \|^{\gamma} + \beta^{\gamma}$$

$$\gamma \rho \| (P R_i)^T e(t) \| \leq \beta^{-1} \rho^{\gamma} \| (P R_i)^T e(t) \|^{\gamma} + \beta$$

سپس داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) (e^T (A_i - G_i C)^T P + P (A_i - G_i C) e + \beta - (\gamma \rho \\ &\quad - \beta^{-1} \rho^{\gamma}) \| (P R_i)^T e \|^{\gamma}) \quad (12-3) \end{aligned}$$

با انتخاب $\gamma \geq 0.5 \beta^{-1} \rho^{\gamma}$ می‌توان نوشت:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi) (e^T (A_i - G_i C)^T P + P (A_i - G_i C) e + \beta) \quad (13-3)$$

با استفاده از نامساوی (۳-۷)، رابطه فوق بصورت زیر قابل نمایش است:

$$\dot{V} \leq -e^T Q e + \beta \quad (14-3)$$

با انتخاب $\alpha = 0.5 \lambda_{\min}(P^{-1} Q) > 0$ ، رابطه (۳-۱۳) بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{V} \leq -\gamma \alpha V(e) + \beta \quad (15-3)$$

در نتیجه طبق تعریف تابع لیاپانوف و مقدار مثبت α ، برای $t \rightarrow \infty$ نامساوی زیر برقرار است:

$$\|e\| \leq \sqrt{\frac{\beta}{\lambda_{\min}(P) \gamma \alpha}} \quad (16-3)$$

لذا برای تضمین پایداری و محدود بودن خطای تخمین توسط هر مقدار مثبت از ϵ که $\|e\| < \epsilon$ ،

کافیست که انتخاب $\gamma \geq 0.5 (\lambda_{\min}(P^{-1} Q) \lambda_{\min}(P) \epsilon^{\gamma})^{-1} \rho^{\gamma}$ صورت گیرد.

لازم به ذکر است که در رابطه (۷-۳)، P و G_i غیرخطی هستند. برای خطی سازی نامساوی مذکور، تغییر متغیر زیر استفاده می شود:

$$K_i = PG_i \quad (۱۷-۳)$$

ماتریس های K_i و P توسط روش LMI [۵۳] از حل چند جمله ای زیر حاصل می شود:

$$A_i^T P + PA_i - C^T K_i^T - K_i C < -Q \quad (۱۸-۳)$$

$$W_i C = R_i^T P$$

در نهایت ماتریس بهره G_i بصورت زیر محاسبه می شود:

$$G_i = P^{-1} K_i \quad (۱۹-۳)$$

۴_۳ طراحی رویتگر فازی به منظور تشخیص خطا برای مدل سیستم تعلیق قطار

مدل غیرخطی سیستم تعلیق قطار بصورت زیر ارائه می شود [۵۴]:

$$\dot{u} = vr - fg + \frac{fk_1 - k_2}{M} u^2 + c_f \frac{v + ar}{Mu} \sigma + \frac{T}{M} \quad (۲۰-۳)$$

$$\dot{v} = -ur - \frac{(c_f + c_r)}{Mu} v + \frac{(-ac_f + bc_r)}{Mu} r + \frac{(c_f \sigma + T \sigma)}{M}$$

$$\dot{r} = \frac{(-ac_f + bc_r)}{I_z u} v - \frac{(a^y c_f + b^y c_r)}{I_z u} r + \frac{aT \sigma + ac_f \sigma}{I_z}$$

متغیرهای حالت سیستم به ترتیب سرعت طولی، سرعت جانبی و نرخ یاو می باشند که به ترتیب با u ،

v و r نمایش داده می شوند. سیگنال های کنترل ورودی نیز به ترتیب زاویه فرمان σ و نیروی ترمز T

می باشند. مدل سیستم بصورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{x} = F(x, w) \quad (۲۱-۳)$$

$$y = Cx, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \cdot & \\ & & \cdot \end{pmatrix}$$

در این بخش به منظور طراحی رویتگر فازی، مدل سیستم، بایستی بصورت مدل فازی تاکاگی -

سوگنو نمایش داده شود؛ از اینرو نیاز به خطی سازی حول چند نقطه کار می باشد. مدل فازی T-S

پیشنهادی برای سیستم مذکور بصورت زیر ارائه می شود:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^N \mu_i(y_i = u)(A_i x + B_i w + D_i) \quad (22-3)$$

$$A_i = \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=x^{(i)}, w=w^{(i)}}$$

$$B_i = \frac{\partial F}{\partial w} \Big|_{x=x^{(i)}, w=w^{(i)}}$$

$$D_i = F(x^{(i)}, w^{(i)}) - A_i x^{(i)} - B_i w^{(i)}$$

لذا:

$$\sum_{i=1}^N \mu_i(u) = 1 \quad \text{and} \quad \mu_i(u) \geq 0 \quad (23-3)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} A_{11i} & A_{12i} & A_{13i} \\ A_{21i} & A_{22i} & A_{23i} \\ A_{31i} & A_{32i} & A_{33i} \end{pmatrix}, B_i = \begin{pmatrix} c_f \frac{v_i + ar_i}{Mu_i} & \frac{1}{M} \\ \frac{c_f + T_i}{M} & \frac{\sigma_i}{M} \\ \frac{aT_i + ac_f}{I_z} & \frac{a\sigma_i}{I_z} \end{pmatrix}$$

بر اساس نقاط کار زیر

$$(24-3)$$

$$P_i = \begin{bmatrix} X_i \\ W_i \end{bmatrix}, P_1 = \begin{bmatrix} 14.36 \\ 1.22 \\ 1.34 \\ -0.14 \\ -0.32 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 16.74 \\ -0.61 \\ 0.47 \\ 0.44 \\ -0.32 \end{bmatrix}, p_1 = \begin{bmatrix} 18.39 \\ -0.84 \\ 0.59 \\ 0.29 \\ -0.32 \end{bmatrix}$$

سه مدل خطی شده برای تقریب رفتار سیستم غیرخطی در نظر گرفته شده است:

$$(25-3)$$

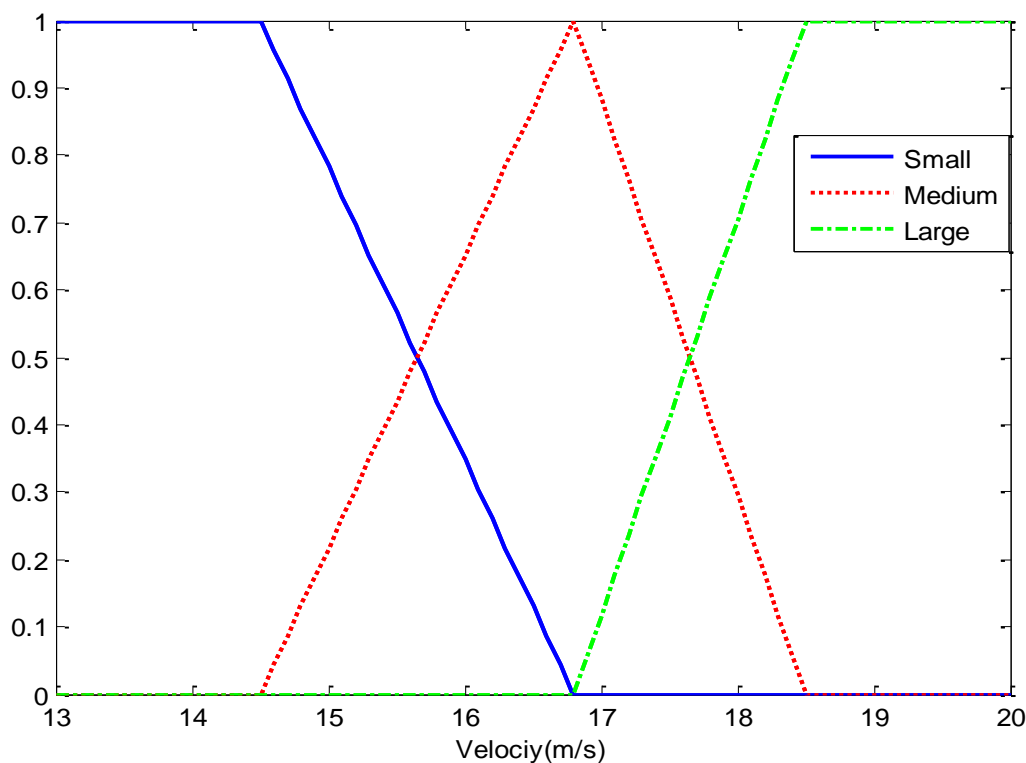
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.052 & 0.403 & 0.239 \\ -0.366 & -1.082 & -13.743 \\ 0.728 & 0.388 & -11.89 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{pmatrix} 10.99 & 7e^{-f} \\ 91.216 & -1e^{-f} \\ 60.319 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.085 & 2.895 & 1.925 \\ -0.989 & -9.282 & -16.213 \\ 0.507 & 0.333 & -10.198 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{pmatrix} 3.359 & 7e^{-f} \\ 91.216 & 3e^{-f} \\ 60.319 & 2e^{-f} \end{pmatrix}$$

$$A_{\gamma} = \begin{pmatrix} -0.031 & 2.065 & 0.693 \\ -1.141 & -8.468 & -17.87 \\ 0.441 & 0.303 & -9.303 \end{pmatrix} \quad B_{\gamma} = \begin{pmatrix} 1.548 & 7e^{-4} \\ 91.216 & 2e^{-4} \\ 60.319 & 1e^{-4} \end{pmatrix}$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} -0.832 \\ 5.259 \\ -10.46 \end{pmatrix} \quad D_{\gamma} = \begin{pmatrix} 0.087 \\ 16.562 \\ -8.496 \end{pmatrix} \quad D_{\gamma} = \begin{pmatrix} 0.392 \\ 20.951 \\ -8.092 \end{pmatrix}$$

این سه مدل در نظر گرفته شده تابع تغییرات سرعت طولی سیستم غیرخطی هستند در نتیجه توابع تعلق فازی برای سیستم فازی بصورت زیر بر حسب سرعت طولی تعبیه شده است:



شکل (۱-۳) توابع تعلق سیستم فازی برای متغیر سرعت طولی

خطای در نظر گرفته شده، نیروی باد است که دچار اختلال در حرکت قطار می شود. اثر خطا بصورت

زیر مدل می شود:

$$\dot{x} = F(x, \sigma, T) + Rm \quad (26-3)$$

$$m = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_{\gamma} \end{pmatrix}$$

رویتگر فازی مطابق توضیحات این فصل بصورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^3 \mu_i(u) (A_i \hat{x} + B_i w + D_i + G_i (y - C \hat{x}) + R_i \hat{m}_i) \quad (27-3)$$

$$\hat{m}_i = \gamma W_i (y - C \hat{x})$$

$$\hat{m} = \sum_{i=1}^3 \mu_i(\xi) \hat{m}_i$$

ماتریس‌های بهره، شرایط اولیه و سایر تنظیمات در فصل چهار ارائه خواهد شد.

۵_۳ طراحی رویتگر فازی جهت تشخیص خطا برای مدل سیستم ترمز قطار

مدل دینامیکی سیستم ترمز قطار بصورت زیر قابل توصیف است [۵۵]:

$$\dot{v} = -w(v) - b(v)u_b + f(v)u_m - g(x) \quad (28-3)$$

$$\dot{x} = v$$

که v سرعت، $b(v)$ ماکزیمم نیروی ترمزی و u_m ماکزیمم نیروی کششی است که واحد آن نیرو بر واحد جرم است، u_b ضریب نیروی ترمز، u_m ضریب نیروی کشش، $g(x)$ نیروی خارجی و دینامیک اصطحکاک بصورت $w(v) = w_0 + w_1 v + w_2 v^2$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین ماکزیمم نیروی کشش و ترمز را ثابت b در نظر می‌گیریم به طوری که سیگنال کنترلی یکتا بدست می‌آید که $u < 0$ معادل u_b و $u > 0$ معادل u_m است. لازم به ذکر است که سیگنال کنترل بدون واحد است و واحد b نیز نیرو بر واحد جرم است.

طراحی رویتگر فازی T-S مشابه بخش قبل می‌باشد و از تکرار روابط ریاضی یکسان خودداری شده است. مدل غیرخطی سیستم ترمز بصورت مدل‌های خطی زیر جهت اعمال رویتگر مذکور، توصیف می‌شود:

ماتریس‌های A_i ، B_i ، C_i ، D_i توسط خطی‌سازی حول نقاط کار بدست می‌آید. اندیس i ام نشان دهنده‌ی رفتار محلی سیستم حول نقطه کار i است. معادله (۲۷-۳) را اگر به ازای دو نقطه کار

$P_2 = \begin{bmatrix} 1.5 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$ و $P_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$ خطی سازی کنیم، A_i ، B_i و C_i به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\dot{X}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + E_i T_m(t) \quad (29-3)$$

$$Y = Cx(t)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.15 & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.05 & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_2 = [1 \quad 1]$$

سیستم فازی TS طراحی شده دارای یک ورودی (متغیر حالت اول) بوده و با توجه به اینکه دو تابع

تعلق (شکل (2-3)) منظور کرده‌ایم، لذا تعداد قوانین دو می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\text{Rule } i = 1, \dots, r : \text{IF } x_1(t) \text{ is } F_i \text{ Then} \quad (30-3)$$

$$\dot{X}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + E_i T_m(t)$$

در واقع به این مفهوم است بسته به اینکه ورودی سیستم فازی (سرعت قطار) در چه وضعیتی از تابع

تعلق قرار بگیرد، دسته ماتریس‌های اول یا دوم مطابق با روابط فوق اتخاذ گردد.

لازم به ذکر است که انتخاب نوع توابع تعلق فازی، تعداد آن‌ها و بازه‌ی تغییرات ورودی‌های سیستم

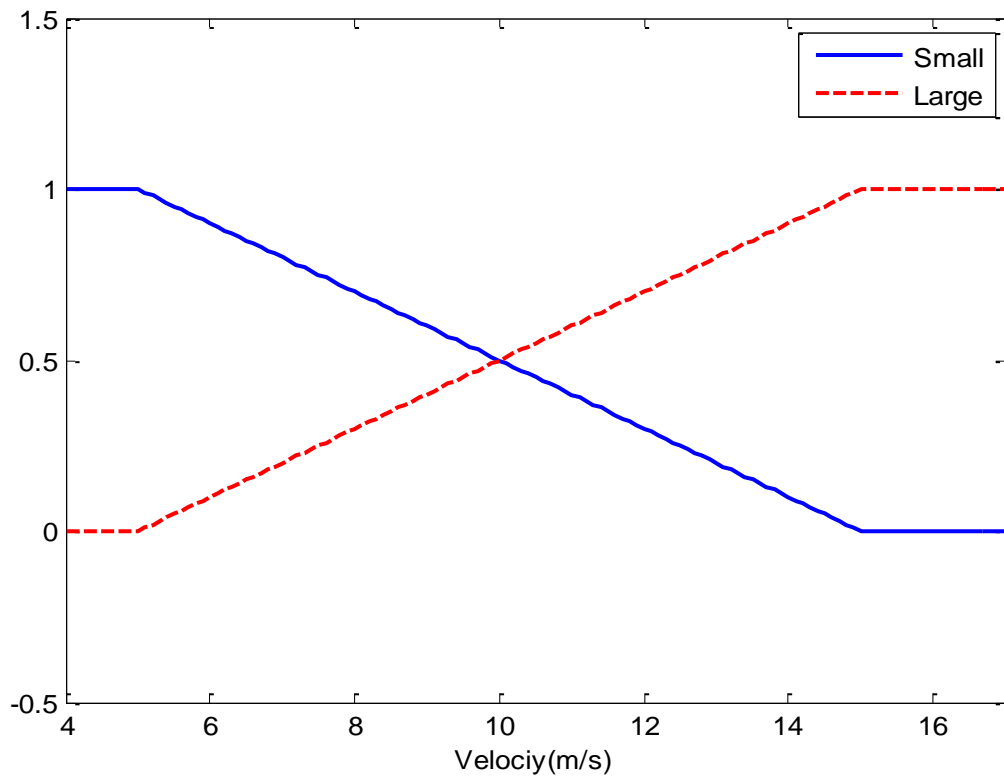
فازی، توسط طراح صورت می‌گیرد. همچنین ابتدا و انتهای توابع تعلق، باز در نظر گرفته می‌شود چراکه

سیستم فازی به ازای ورودی‌های احتمالی خارج از بازه‌ی تغییرات تعریف شده، عملکرد مناسبی داشته

باشد. تابع تعلق که در سمت چپ تصویر قرار می‌گیرد معمولاً با اندیس کوچک و تابع تعلق سمت

راست تصویر با اندیس بزرگ نامگذاری می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که بازه تغییرات گروه‌های

فازی بر اساس ناحیه کاری سیستم انتخاب شده است.



شکل (۲-۳) توابع تعلق سیستم فازی برای متغیر سرعت

فصل ۴ نتایج شبیه سازی

در این فصل ماتریس‌های بدست آمده از طراحی رویتگر پیشنهادی برای سیستم تعلیق قطار و سیستم ترمز قطار بیان می‌شود. همچنین نتایج شبیه سازی رویتگر طراحی شده و رویتگر عصبی (جهت مقایسه) ارائه می‌گردد. پارامترها و ماتریس‌های بکار رفته در شبیه سازی برای سیستم تعلیق قطار بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$(u. v. r.) = (15 \ 0 \ 0), \quad (\hat{x}_1(\cdot) \ \hat{x}_2(\cdot) \ \hat{x}_3(\cdot)) = (16 \ 1 \ 1) \quad (1-4)$$

$$G_1 = \begin{pmatrix} 9.22 & -3.88 \\ 0.45 & -1.02 \\ 22.51 & -11.92 \end{pmatrix}, G_2 = \begin{pmatrix} 10.78 & -4.1 \\ 6.64 & 0.55 \\ 27.38 & -16.19 \end{pmatrix},$$

$$G_3 = \begin{pmatrix} 8.49 & -4.83 \\ 4.40 & 1.36 \\ 20.27 & -17.07 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$W_1 = W_2 = W_3 = \begin{pmatrix} 34.14 & 0 \\ 0 & -10 \end{pmatrix}$$

همچنین برای سیستم ترمز قطار ماتریس‌های تنظیم بصورت زیر می‌باشد:

$$G_1 = 5 \times \begin{pmatrix} 6.26 \\ 6.83 \end{pmatrix}, \quad G_2 = G_1 \quad (2-4)$$

$$W_1 = W_2 = 2, \quad R = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

به منظور مقایسه، رویتگر عصبی مبتنی بر تئوری لیونبرگر [۵۶] بصورت زیر طراحی شده است. مدل غیرخطی سیستم بصورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{x}(t) = Ax + g(x, u) \quad (3-4)$$

$$y = Cx(t)$$

که $g(x, u)$ بردار توابع غیرخطی سیستم به انضمام خطا و عدم قطعیت‌ها است. رویتگر عصبی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x} + \hat{g}(\hat{x}, u) + K(y - \hat{y}) \quad (4-4)$$

$$y = C\hat{x}(t)$$

که K بهره رویتگر می‌باشد و در شرط هرویتز بودن $A - KC$ باید صدق کند. خطای تخمین و سیگنال

مانده بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$e = x - \hat{x} , e_y = y - \hat{y} \quad (5-4)$$

طبق روابط (3-4) تا (5-4) داریم:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - KC)e + g - \hat{g} \quad (6-4)$$

سیستم عصبی مطابق زیر توصیف می‌شود:

$$\hat{g} = \hat{V}^T \phi(\hat{W}\hat{z}) \quad (7-4)$$

که $z = [x \ u]$ است. لازم به ذکر است که ساختار شبکه‌ی عصبی استفاده شده بر پایه روش پرسپترون چند لایه است. با جایگذاری (7-4) در (6-4) داریم:

$$\dot{e} = A_c e + e_v^T \phi(\hat{W}\hat{z}) + V^T (\phi(Wz) - \phi(\hat{W}\hat{z})) + \epsilon \quad (8-4)$$

که $e_v = V - \hat{V}$, $A_c = A - KC$. همچنین ϵ بیانگر خطای تقریب رویتگر عصبی می‌باشد و از آنجایی که این مقدار خطای هرچند ناچیز در روند اثبات پایداری رویتگر عصبی لحاظ نشده است، لذا از دیدگاه آنالیز پایداری نسبت به روش پیشنهادی مبتنی بر منطق فازی، ضعیف‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است که اساس مقایسه انجام شده این دو رویتگر مذکور، ساختار آزاد از مدل بودن آنهاست. برای بررسی بهتر رویتگرهای طراحی شده، شبیه سازی برای حالت‌های مختلف انجام شده است و نتایج آن در این بخش آورده شده است. حالت‌های در نظر گرفته شده برای سیستم ترمز به این صورت است:

- رویتگر فازی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا
- رویتگر فازی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا
- رویتگر عصبی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا
- رویتگر عصبی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا

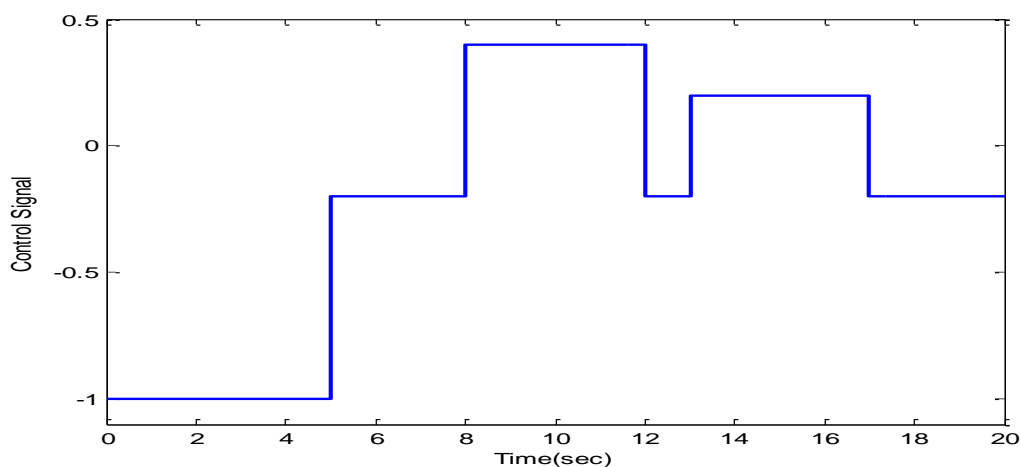
همچنین برای سیستم تعلیق چهار حالت به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

- رویتگر فازی برای سیستم تعلیق بدون وجود خطا

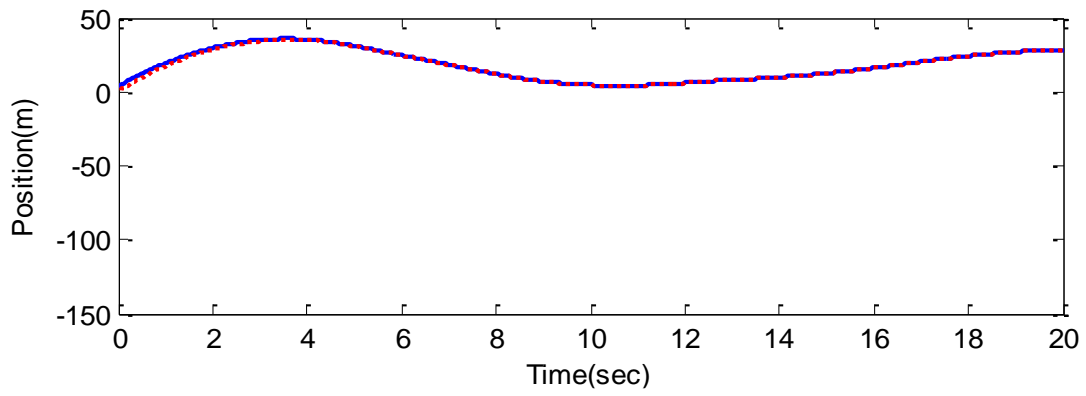
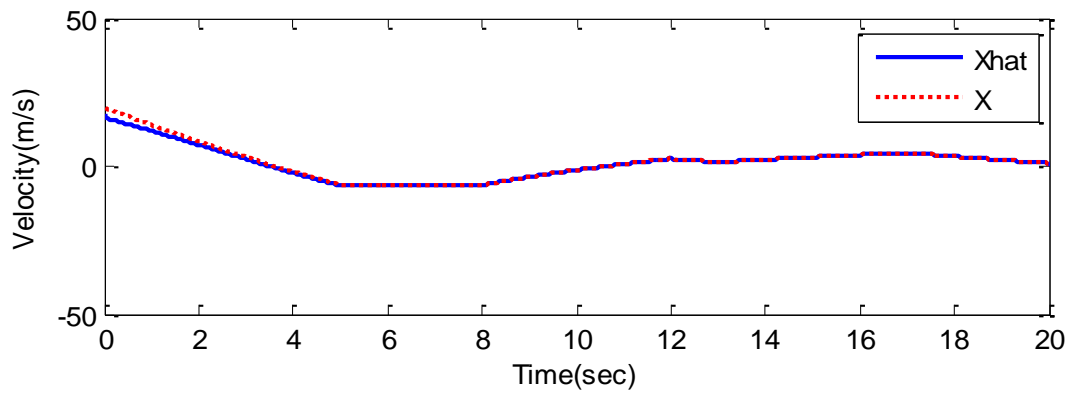
- رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطا مربعی
- رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطا سینوسی
- رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطا توام مربعی و سینوسی

۲_۴ رویتر فازی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا

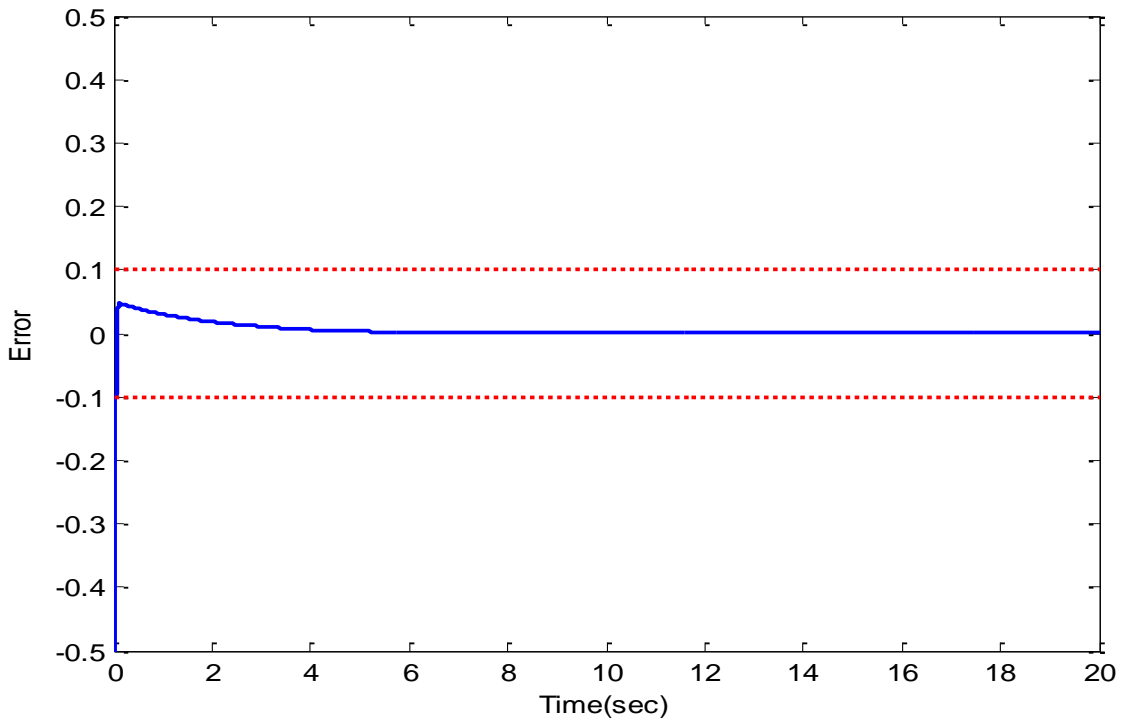
در این قسمت سیگنال کنترل به عنوان ورودی مطابق شکل (۱-۴) به سیستم وارد می‌شود. همان طور که در فصل مدلسازی بیان شد این سیگنال کنترل ترکیبی ضریب ماکزیمم نیروی کشش و ماکزیمم نیروی ترمز است؛ به عبارتی مقدار منفی این سیگنال نشان دهنده اعمال نیروی کشش و قسمت مثبت نشان دهنده اعمال نیروی ترمز است. همچنین با توجه به این که این سیگنال ضریب مقادیر ماکزیمم نیروی کشش و ترمز است بازه‌ی تغییرات آن $[-1 \ 1]$ است. متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها که توسط رویتر فازی انجام شده است در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد با گذشت زمان تخمین متغیرها به سمت مقادیر واقعی میل می‌کنند. در شکل (۳-۴) تفاضل خروجی از خروجی تخمین زده شده نشان داده شده است که چون در سیستم خطایی رخ نداده است، سیگنال مانده هشدار می‌دهد.



شکل (۱-۴) نیروی وارد شده به لوکوموتیو



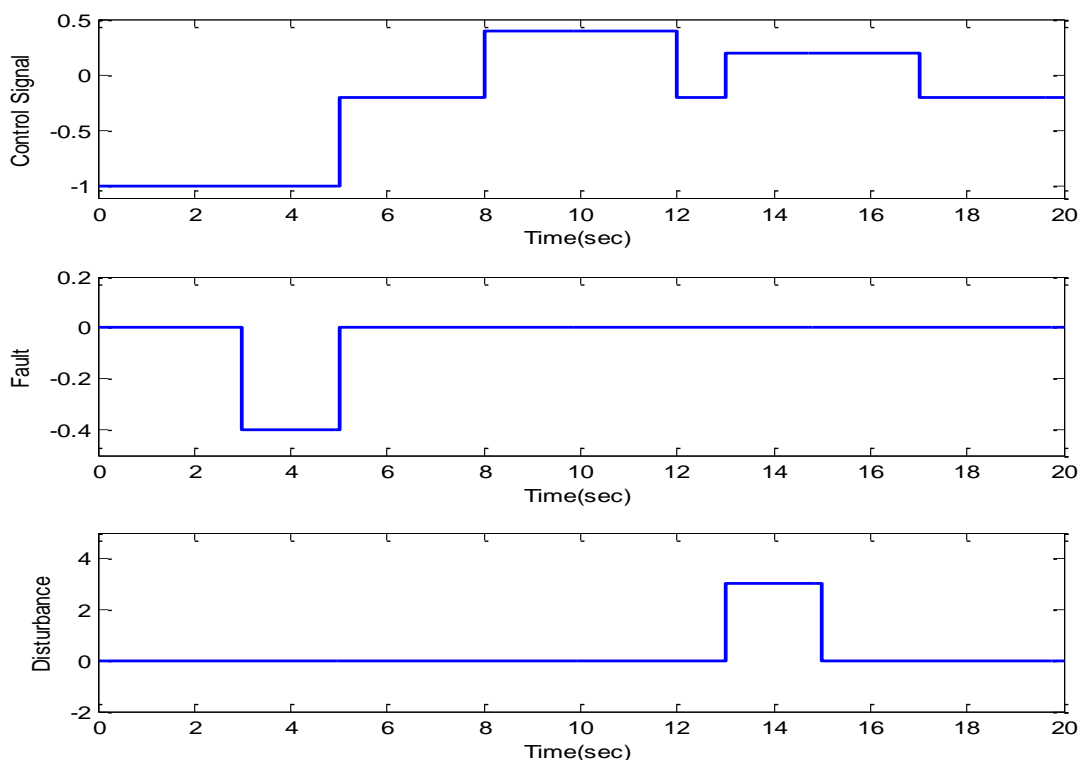
شکل (۲-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها



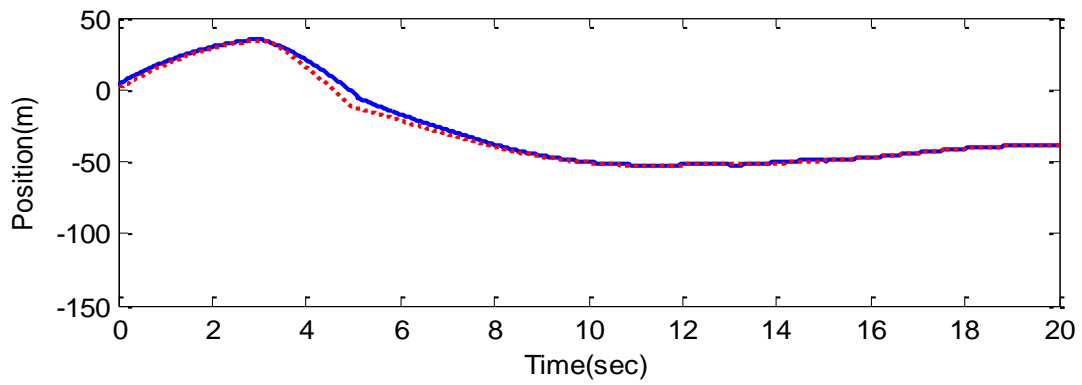
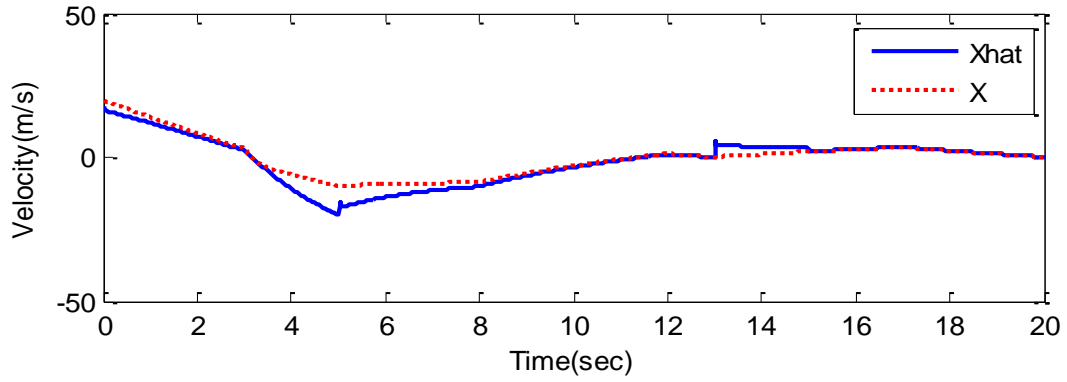
شکل (۳-۴) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

۳_۴ رویتر فازی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا

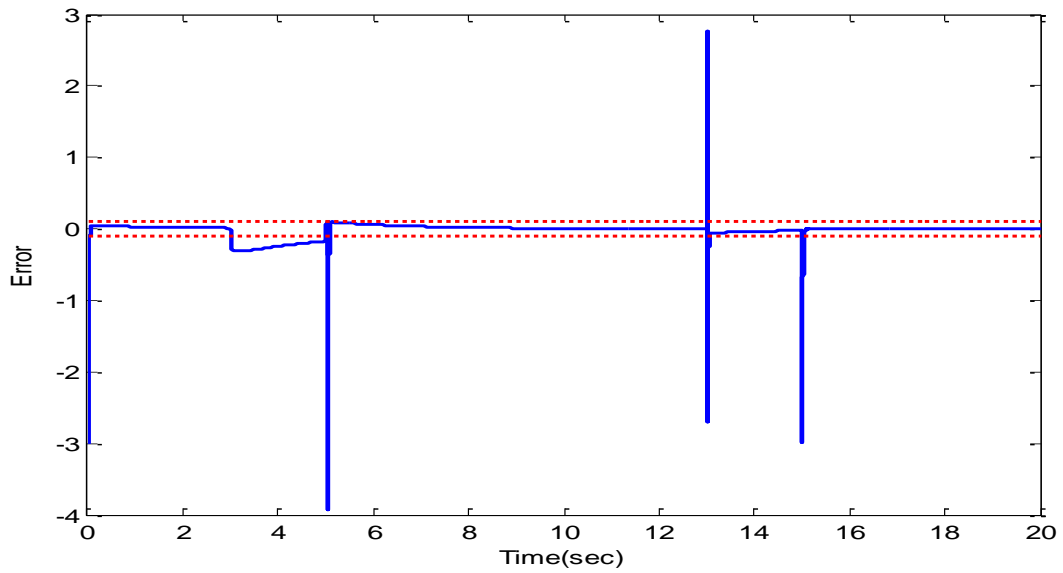
در این حالت به سیستم علاوه بر نیروی ورودی به لوکوموتیو، خطا و اغتشاش را نیز مطابق شکل ذیل وارد می‌شود (شکل (۴-۴)). خطای وارد شده از جنس سیگنال کنترل است که به صورت جمع شونده به سیستم اعمال می‌شود. تاثیر اعمال این خطا در شکل (۵-۴) مشخص است. در ثانیه سوم با اعمال این خطا متغیرهای حالت تخمین زده شده از مقدار واقعی منحرف می‌شوند ولی بعد از حذف خطا خطای تخمین نیز به سرعت کم می‌شود. همچنین به خروجی سیستم اغتشاشی از جنس خروجی به صورت جمع شونده اعمال شده است. مقدار این اغتشاش در شکل (۴-۴) و تاثیر آن در شکل (۵-۴) در ثانیه ۱۳ تا ۱۵ مشخص است. همچنین خطای ردیابی خروجی سیستم توسط رویتر در شکل (۶-۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در زمان وارد شدن خطا و اغتشاش خطای خروجی از مقدار آستانه خطا بیشتر شده است ولی با توجه به عملکرد خوب سیستم رویتر این خطا سریعاً به سمت صفر می‌رود.



شکل (۴-۴) از بالا به پایین: نیروی وارد شده به لوکوموتیو، خطا و اغتشاش



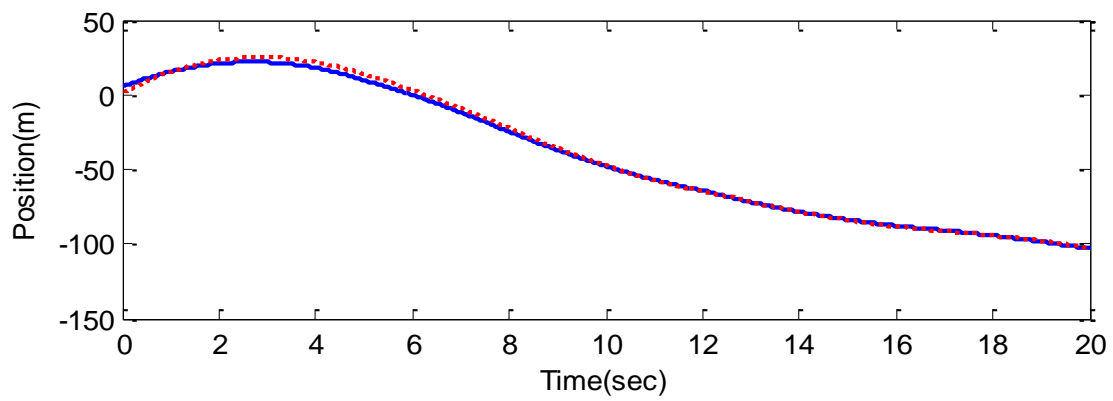
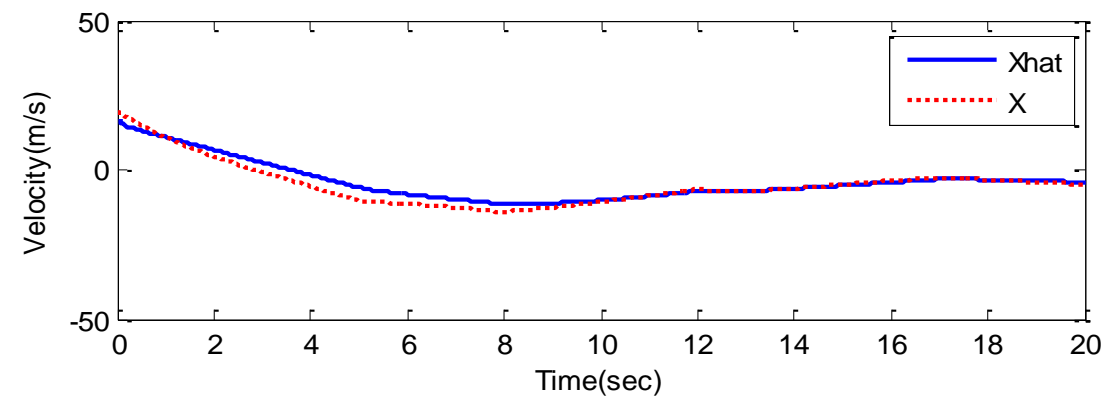
شکل (۴-۵) متغیرهای حالت و تخمین آن ها



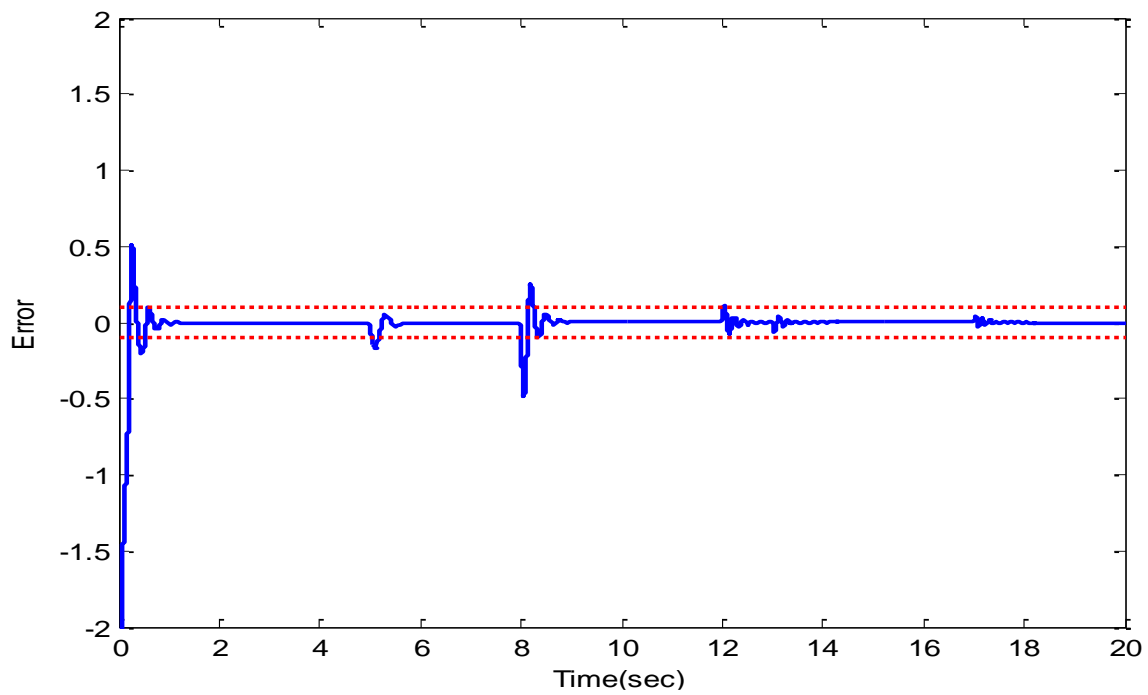
شکل (۴-۶) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

۴_۴ رویتر عصبی برای سیستم ترمز قطار در حالت بدون وارد شدن خطا

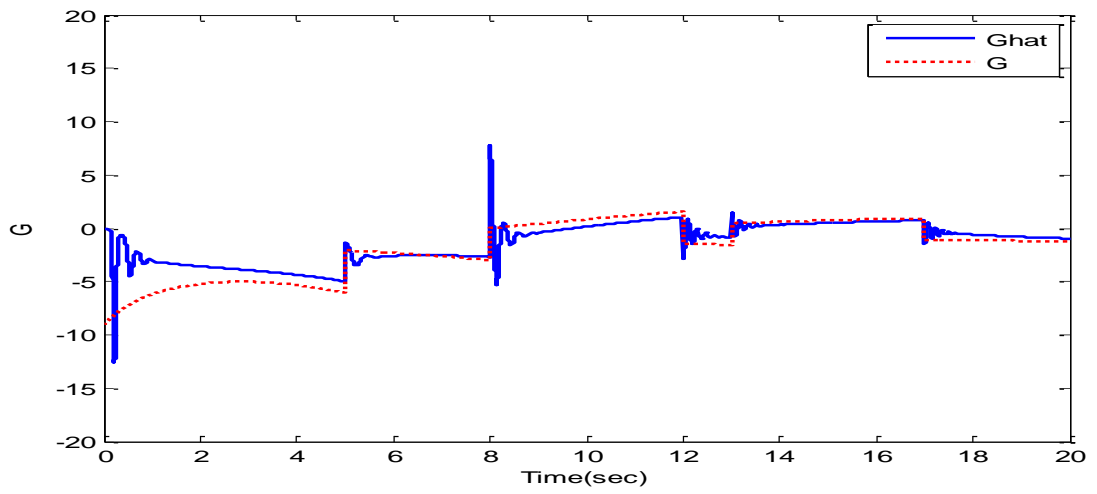
در این بخش نتایج رویتر عصبی طراحی شده برای سیستم ترمز قطار را بررسی می‌کنیم. ورودی شکل (۱-۴) به سیستم وارد می‌شود. متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها که توسط رویتر عصبی انجام شده است در شکل (۷-۴) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است با گذشت زمان تخمین‌ها به سمت مقادیر واقعی میل می‌کنند. در شکل (۸-۴) تفاضل خروجی از خروجی تخمین‌زده شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در لحظاتی که اغتشاش در ورودی و خروجی سیستم ایجاد شده است، خطای ردیابی خروجی زیاد شده است اما مطابق انتظار این خطا با گذشت زمان به سمت صفر می‌رود. همان طور که قبلاً بیان شد در این رویتر قسمتی از دینامیک سیستم توسط شبکه‌ی عصبی تخمین زده شده است. رفتار این دینامیک و تخمین آن در شکل (۹-۴) نشان داده شده است. برای یک سیستم عصبی پایداری وزن‌های آن بسیار حیاتی و مهم است به همین خاطر در شکل (۱۰-۴) مقادیر این وزن‌ها نشان داده شده است. شبکه‌ی عصبی در طراحی شده دارای سه لایه پرسپترون است که وزن‌های هر لایه به تفکیک در شکل مشخص است. با توجه به شکل‌ها این مقادیر محدود هستند و بعد گذشت زمان این وزن‌ها به مقدار ثابتی میرسند. لازم به ذکر است هر چه ورودی سیستم پایاتر باشد و دینامیک سیستم بهتر تحریک شود این وزن‌ها و ساختار شبکه بهتر می‌توانند دینامیک اصلی را تخمین بزنند. همان طور که ملاحظه می‌شود در زمان‌هایی که ورودی سیستم تغییرات ناگهانی داشته مقادیر این وزن‌ها نیز دچار تغییرات شدید شده است.



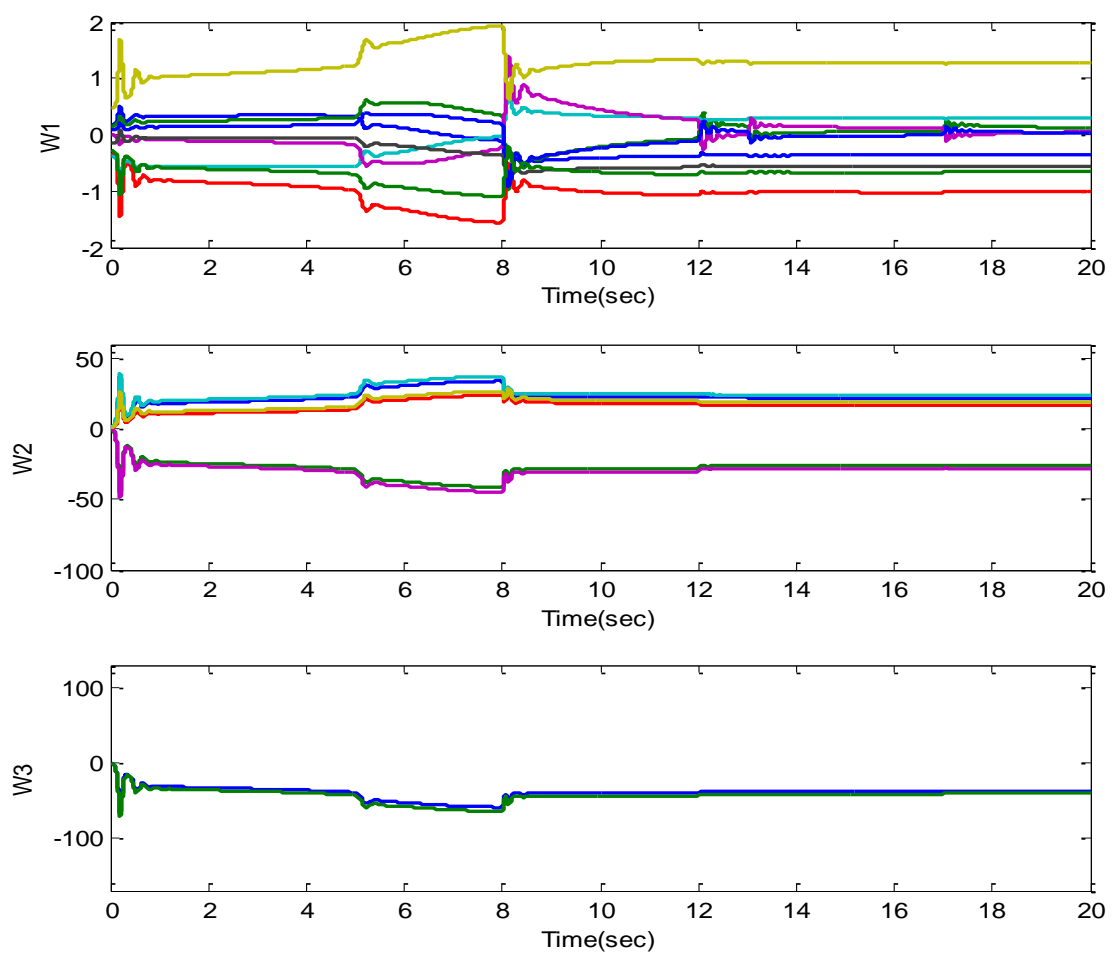
شکل (۷-۴) متغیرهای حالت و تخمین آن ها



شکل (۸-۴) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده



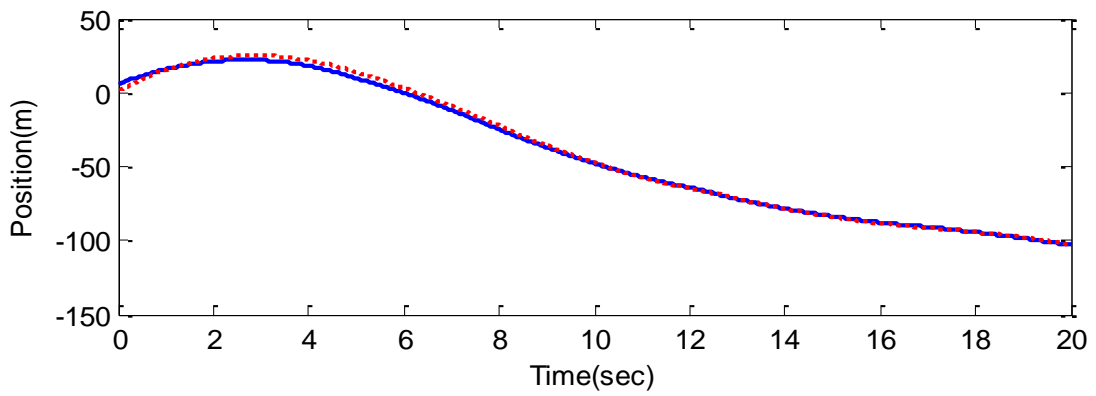
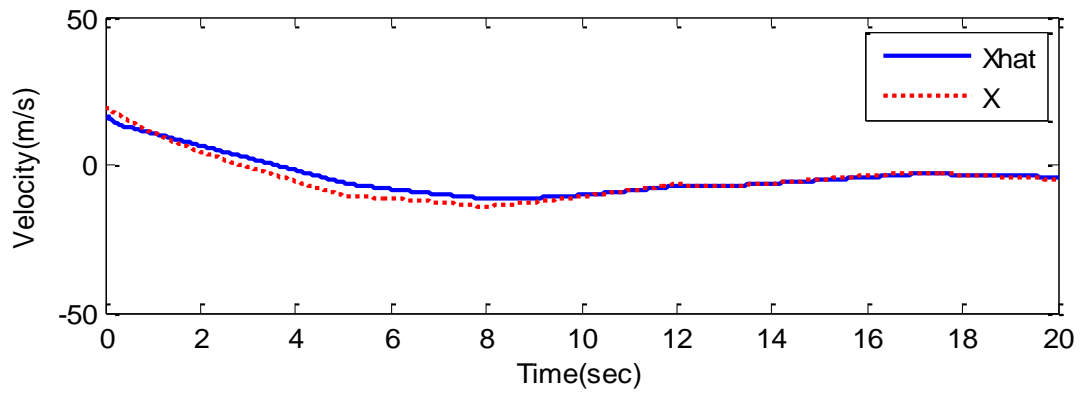
شکل (۹-۴) تخمین دینامیک سیستم



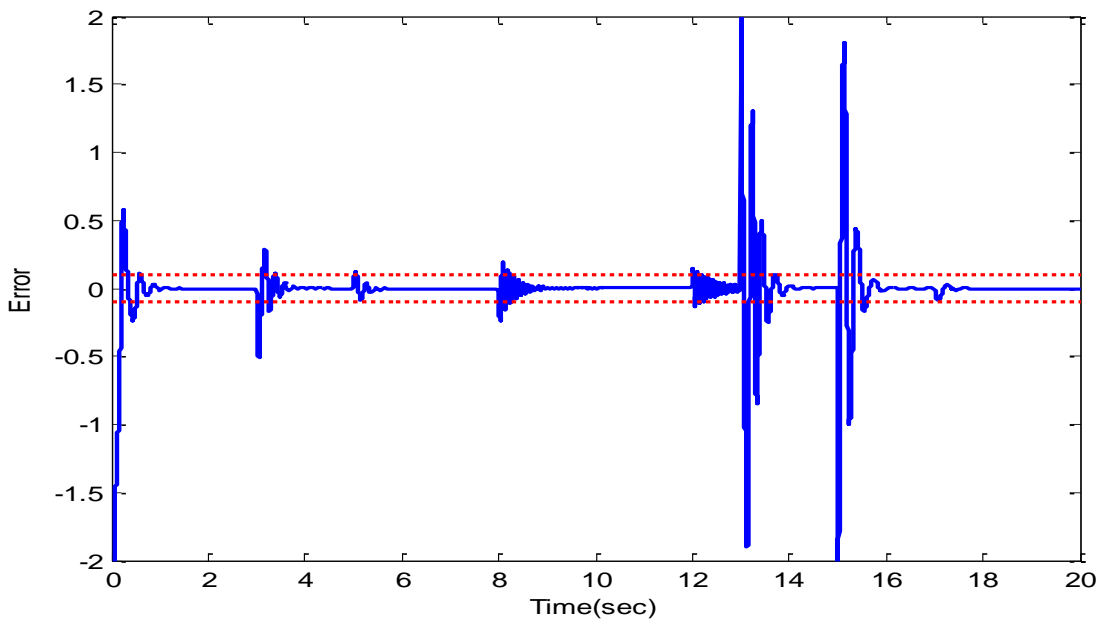
شکل (۱۰-۴) وزن های شبکه ی عصبی

۵_۴ رویتر عصبی برای سیستم ترمز قطار با وجود خطا

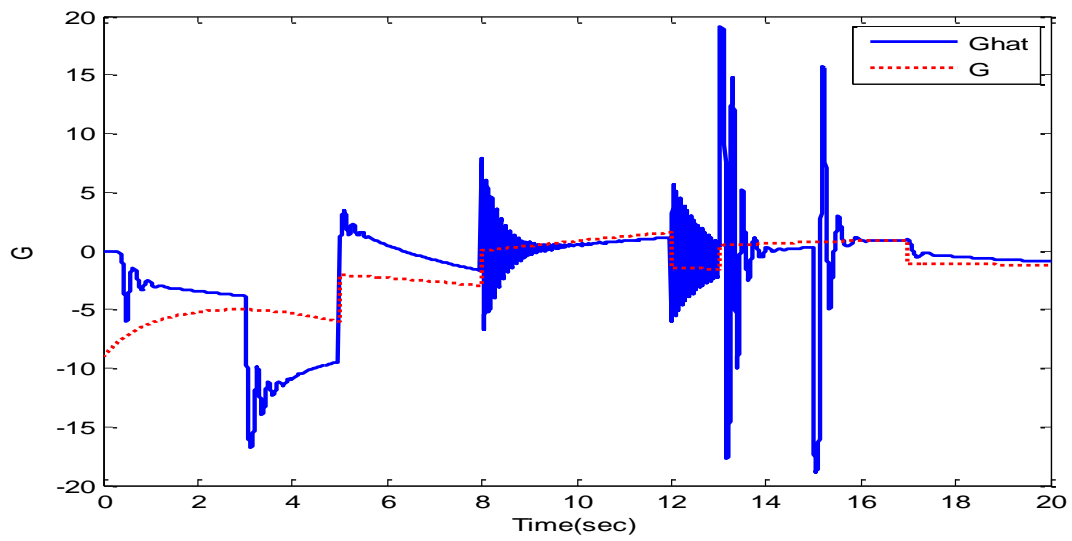
در این حالت به سیستم علاوه بر نیروی ورودی به لوکوموتیو خطا ورودی و اغتشاش خروجی را نیز مطابق شکل (۴-۴) وارد میکنیم. ردیابی حالت‌های سیستم توسط حالت‌های تخمینی در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است در زمان وارد شدن خطا و اغتشاش خطای ردیابی زیاد شده است. همچنین خطای ردیابی خروجی سیستم توسط رویتر در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در زمان وارد شدن خطا و اغتشاش خطای خروجی از مقدار آستانه خطا بیشتر شده است و با گذشت زمان بعد از مقداری نوسان این خطا به سمت صفر می‌رود. تخمین دینامیک سیستم نیز در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. خطای این تخمین هم در زمان‌های وارد شدن خطا و اغتشاش زیاد شده است ولی با حذف اغتشاش و خطا ورودی، خطای ردیابی به سرعت کاهش یافته است. همچنین مقادیر وزن‌ها در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. نکته قابل توجه در شکل (۴-۱۰) این شکل تغییرات ناگهانی و شدید وزن‌های شبکه در زمان اعمال اغتشاش است؛ در این زمان‌ها خطای سیستم افزایش ناگهانی دارد به تبع آن وزن‌ها که با فیدبک خطا اصلاح می‌شوند نیز دارای تغییرات شدید می‌شوند در این شکل مشخص است که با وجود اغتشاش و خطا وارد شده به سیستم باز هم مقادیر وزن‌ها محدود مانده‌اند و باعث ناپایداری شبکه‌ی عصبی نشده‌اند.



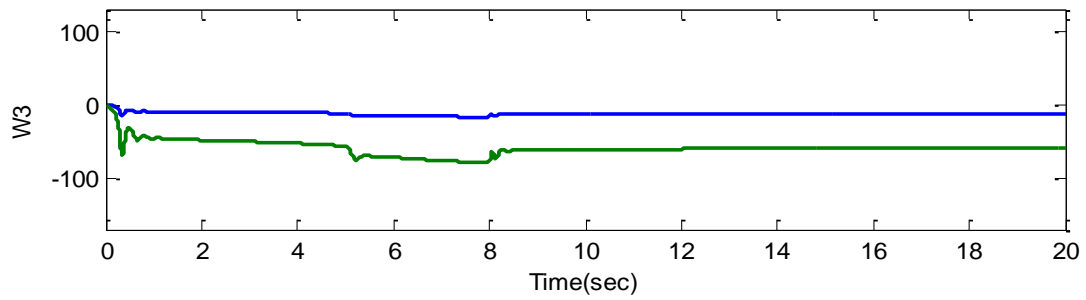
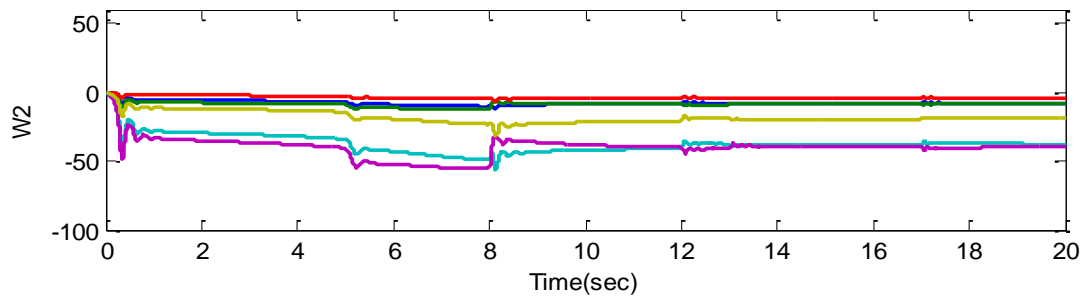
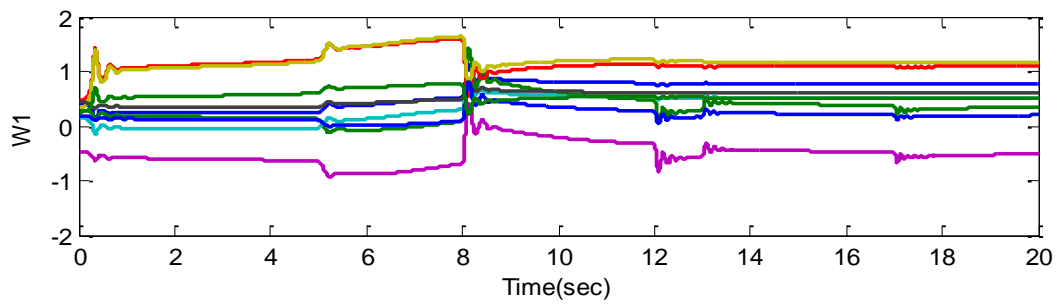
شکل (۴-۱۱) متغیرهای حالت و تخمین آن ها



شکل (۴-۱۲) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده



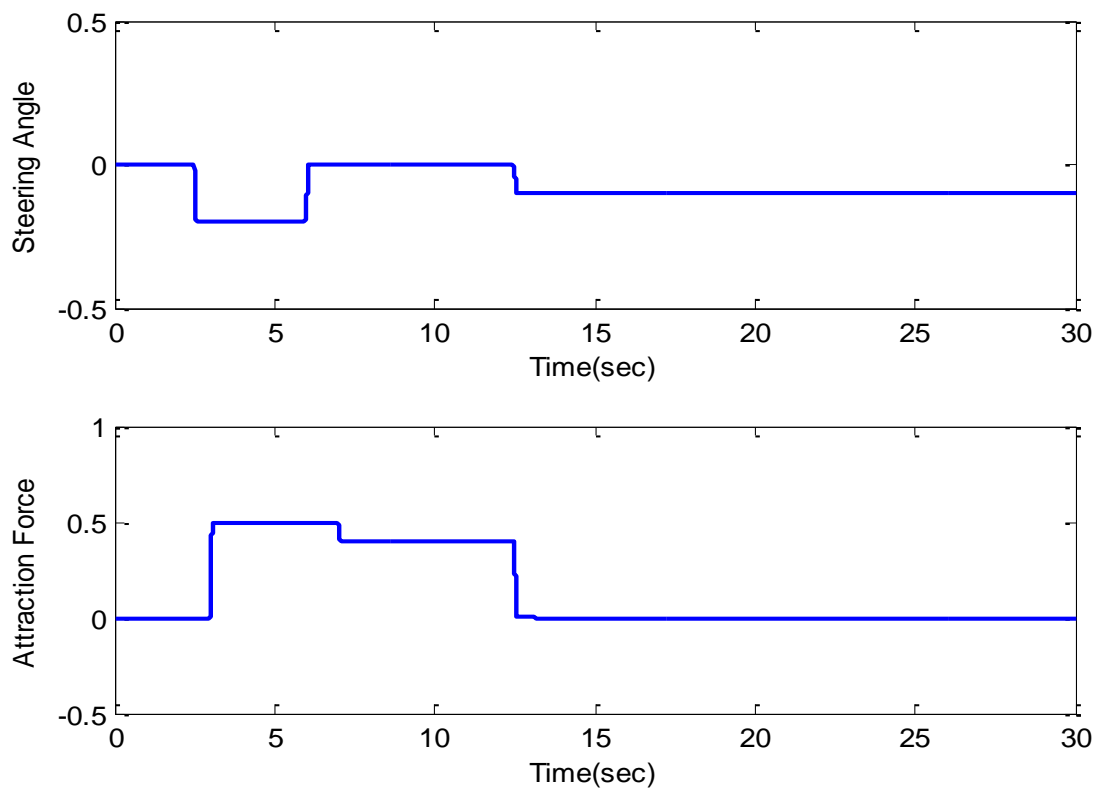
شکل (۴-۱۳) تخمین دینامیک سیستم



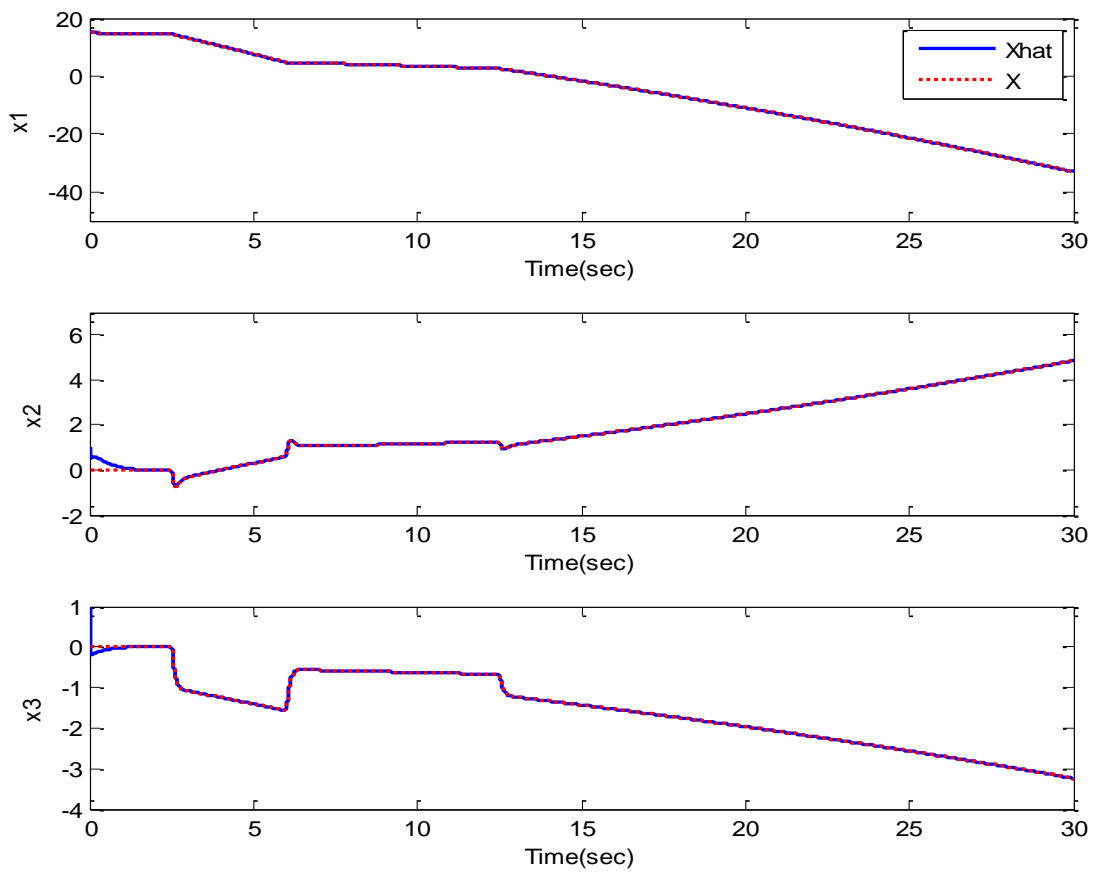
شکل (۴-۱۴) وزن‌های شبکه ی عصبی

۶_۴ رویتر فازی برای سیستم تعلیق بدون وجود خطا

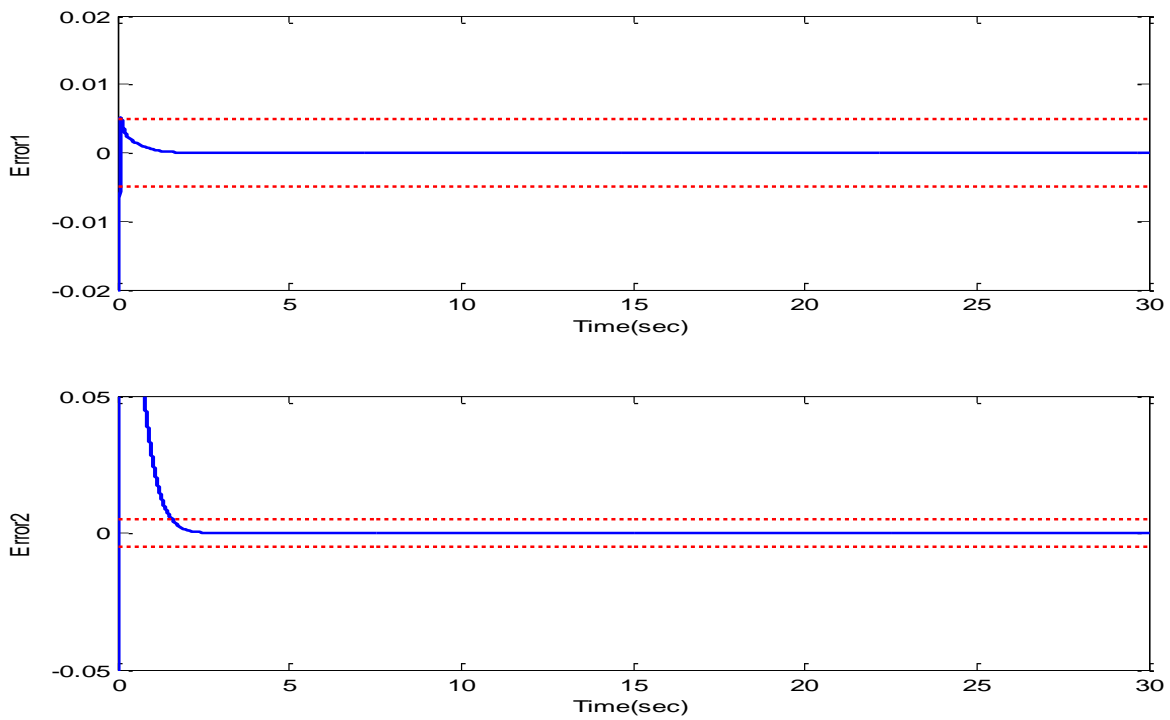
در این قسمت شبیه‌سازی رویتر فازی را برای سیستم تعلیق مورد بررسی قرار می‌دهیم. ابتدا به سیستم فقط ورودی‌های اصلی یا همان سیگنال‌های کنترل اعمال می‌کنیم (شکل (۱۵-۴)). شکل (۱۶-۴) رفتار متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها را نشان می‌دهد که رفتار مشابهی دارند که بیانگر موفقیت رویتر در تخمین حالت‌های سیستم است. خطای تخمین حالت نیز در شکل (۱۷-۴) نشان داده شده است که چون در این سناریو خطای در نظر گرفته نشده لذا هشدار (بالا یا پایین زدگی از آستانه) در آن دیده نمی‌شود.



شکل (۱۵-۴) سیگنال‌های ورودی به سیستم



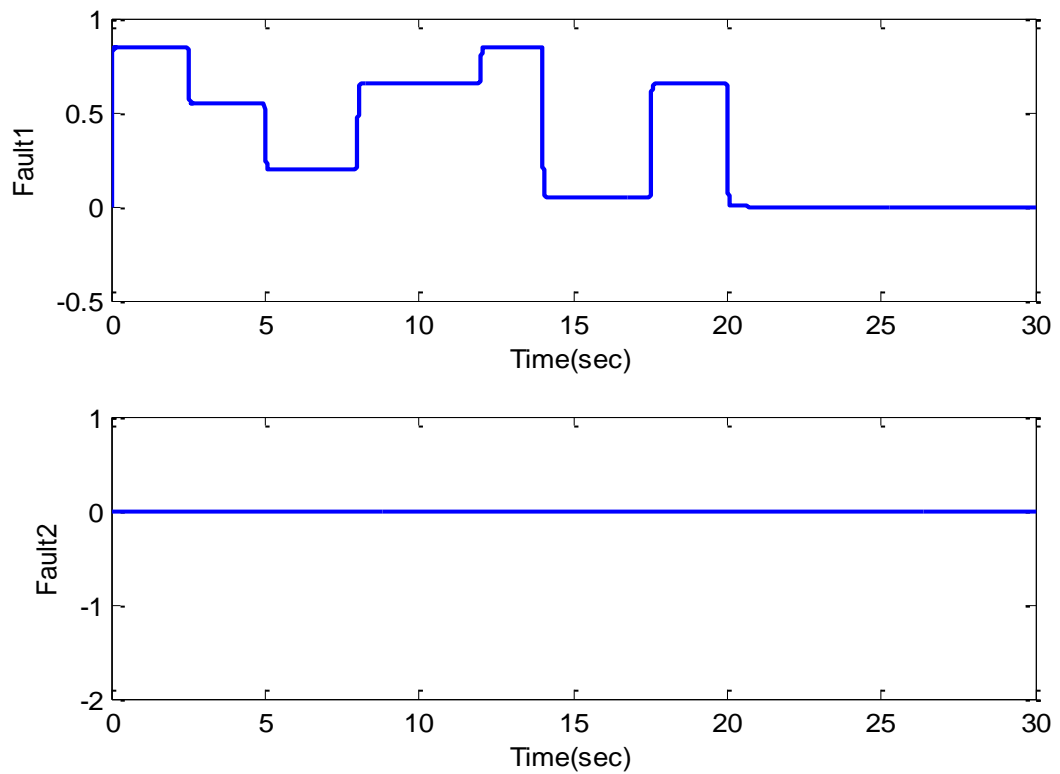
شکل (۴-۱۶) متغیرهای حالت و تخمین آن ها



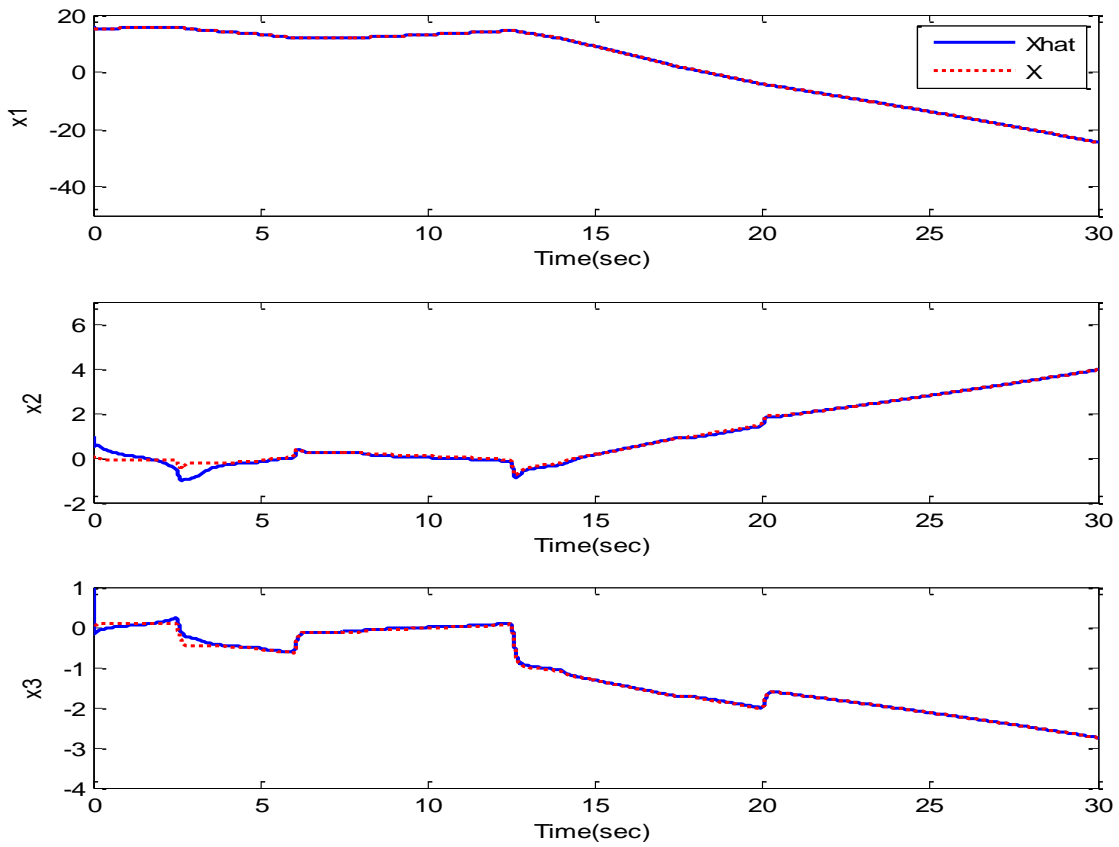
شکل (۴-۱۷) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

۷_۴ رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطای مربعی

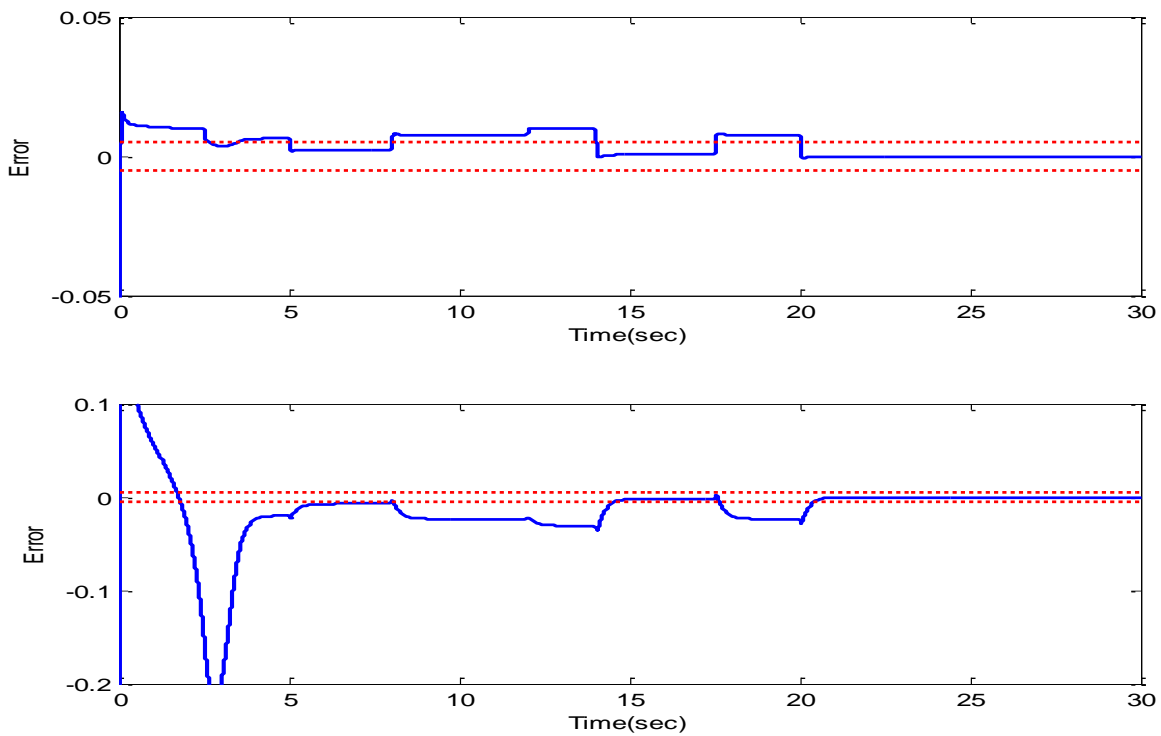
برای این سیستم دو نوع خطا در نظر گرفته شده است، نخست خطا از نوع پله با دامنه‌های متفاوت و دیگری خطا سینوسی. رفتار در نظر گرفته شده برای خطا اول در شکل (۴-۱۸) مشخص است. شکل (۴-۱۹) نشان می‌دهد که ردیابی در مواقع وارد شدن خطا با مشکل مواجه شده است. همچنین در شکل (۴-۲۰) سیگنال‌های مانده و آستانه‌های ثابت در نظر گرفته شده دیده می‌شود. در بازه‌های زمانی که خطا در سیستم وجود دارد بیرون زدگی از آستانه مشاهده می‌گردد که بیانگر وقوع خطا می‌باشد.



شکل (۴-۱۸) خطاهای وارد شده به سیستم



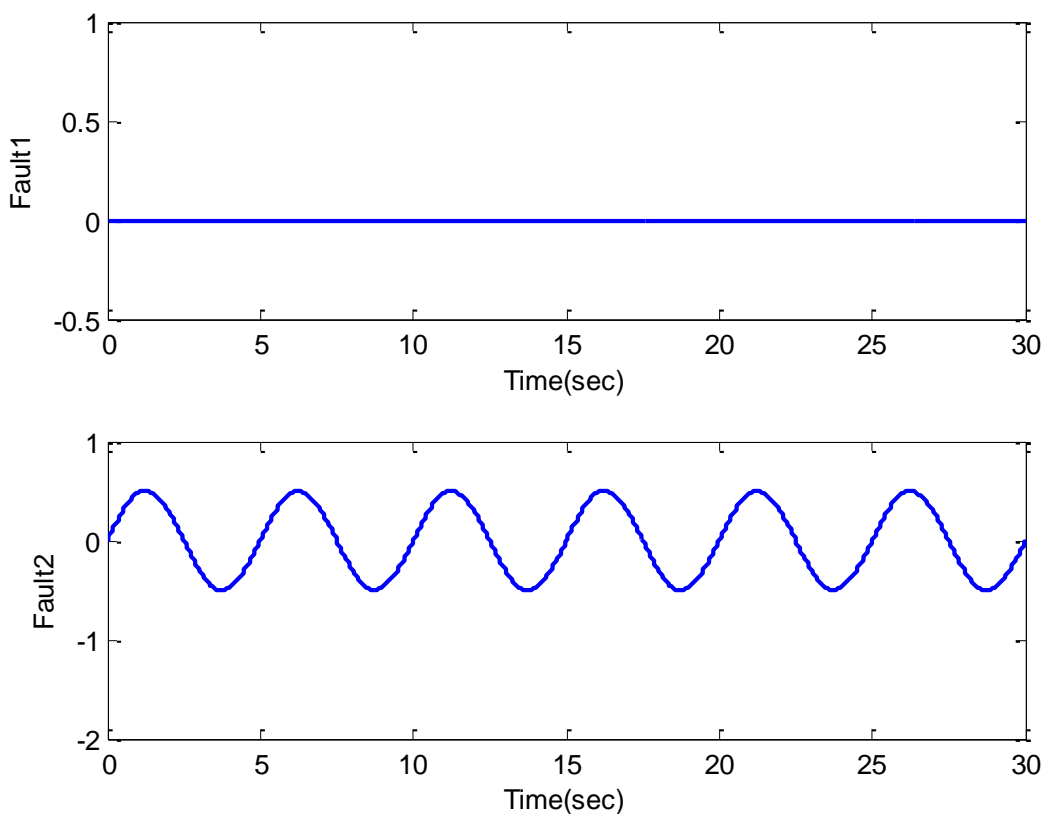
شکل (۴-۱۹) متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها



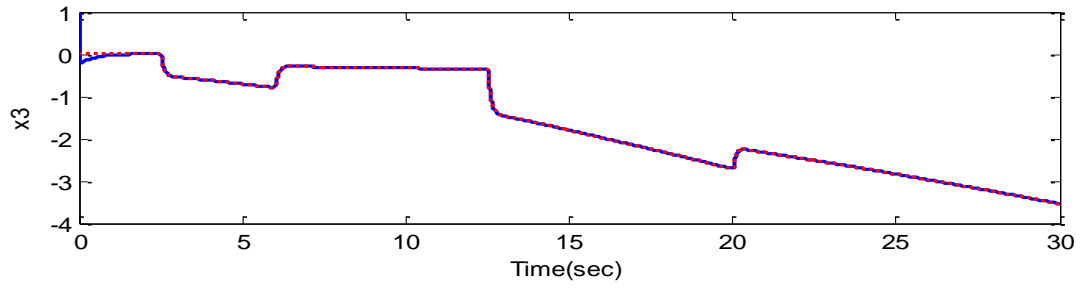
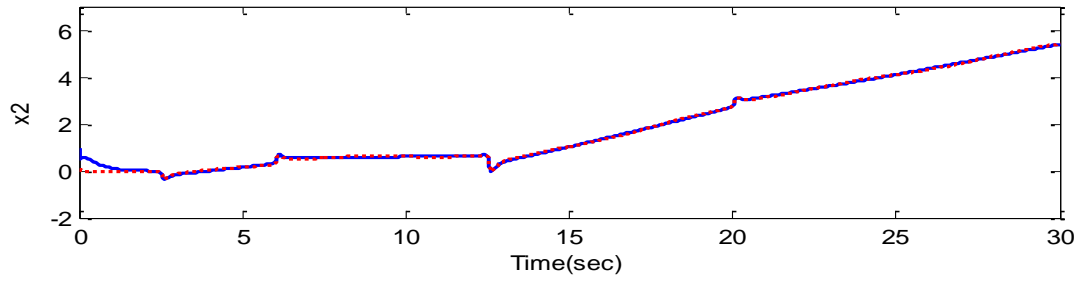
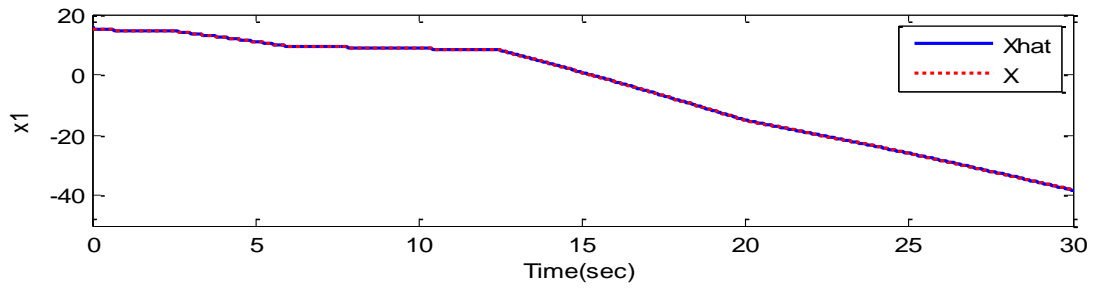
شکل (۴-۲۰) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

۸_۴ رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطای سینوسی

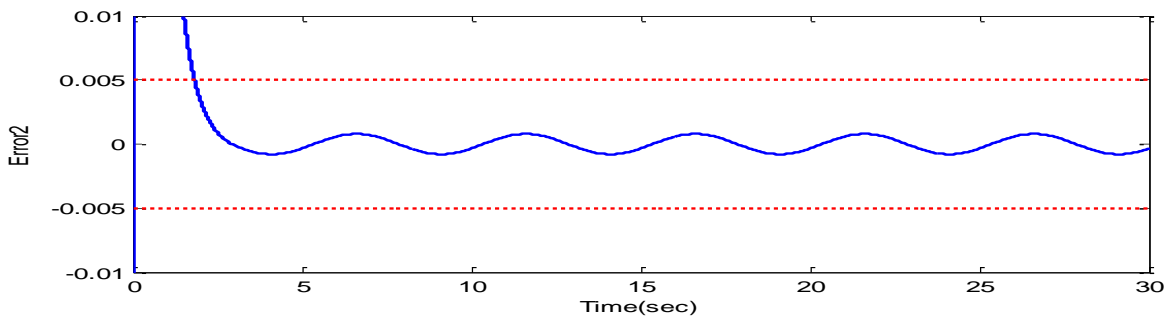
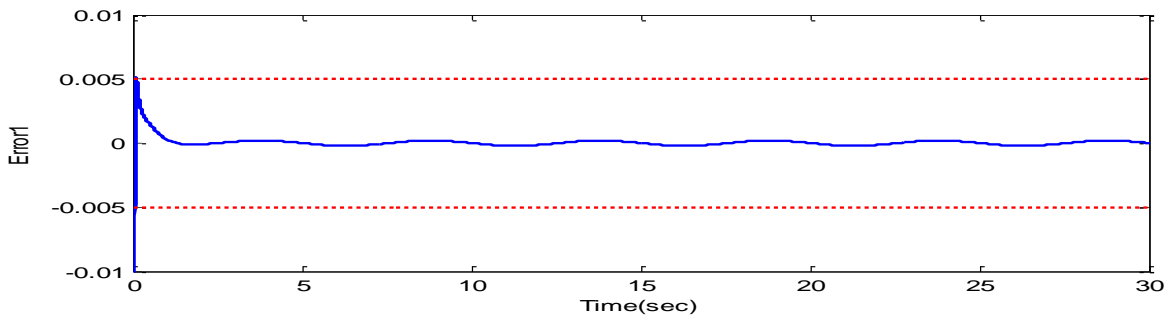
حال به سیستم خطا سینوسی مطابق شکل (۲۱-۴) اعمال می‌کنیم. ردیابی متغیرهای حالت که در شکل (۲۲-۴) آمده است نشان می‌دهد تاثیر خطا سینوسی از خطا مربعی کمتر است و ردیابی نسبت به حالت قبل بهتر انجام شده است. شکل (۲۳-۴) نیز خطای مانده را نشان می‌دهد. از آنجایی که دامنه خطای سینوسی کوچک است بیرون زدگی از آستانه نداریم. بهتر است در این حالت آستانه ثابت کوچکتر در نظر گرفته شود. گفتنی است که تاثیر خطا وارد شده در سیگنال مانده مشهود است.



شکل (۲۱-۴) خطا های وارد شده به سیستم



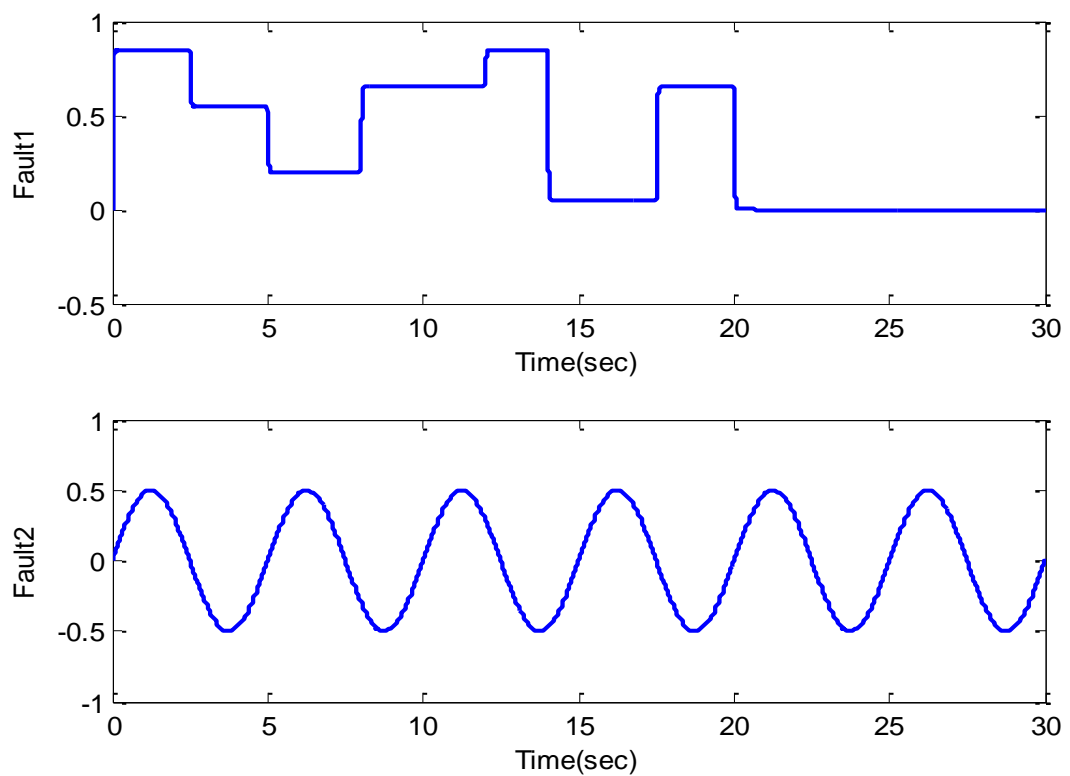
شکل (۴-۲۲) متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها



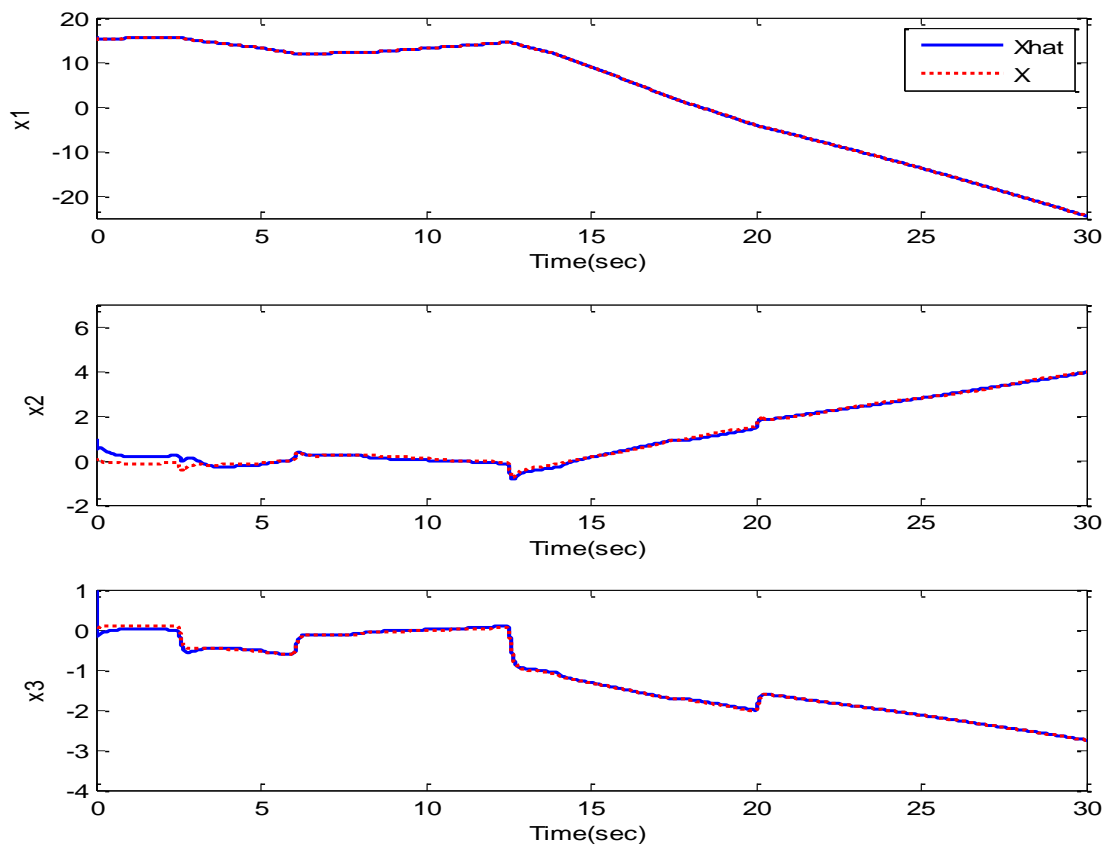
شکل (۴-۲۳) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

۹_۴ رویتر فازی برای سیستم تعلیق با خطای توام مربعی و سینوسی

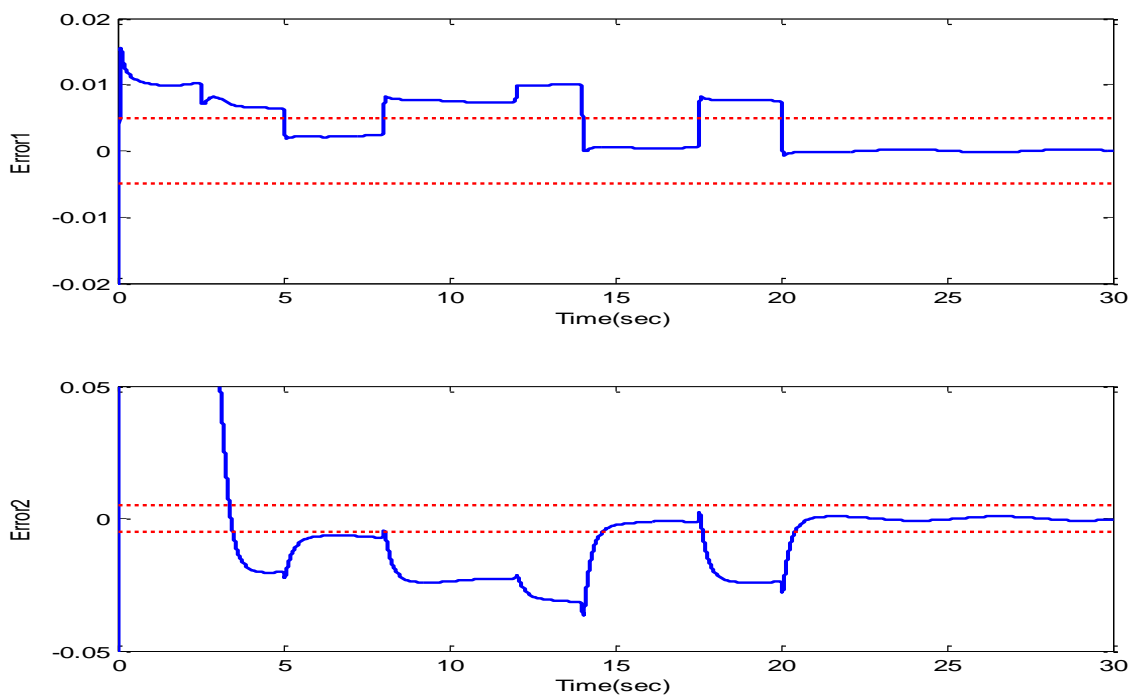
در این حالت هر دو خطا سینوسی و مربعی را به سیستم اعمال می‌کنیم. بررسی شکل‌ها نشان از تاثیر زیاد خطا مربعی بر رویتر دارد. که البته با توجه به تغییرات ناگهانی این نوع خطا و ایجاد مشتق بینهایت این نتایج دور از انتظار نیست. شکل (۴-۲۴) خطا وارد شده به سیستم، شکل (۴-۲۵) رفتار تخمین متغیرهای حالت و شکل (۴-۲۶) خطای تخمین (سیگنال مانده) را نشان می‌دهد که تاثیر خطاها در سیگنال مانده کاملا دیده می‌شود.



شکل (۴-۲۴) خطا های وارد شده به سیستم



شکل (۴-۲۵) متغیرهای حالت و تخمین آن‌ها



شکل (۴-۲۶) تفاضل خروجی و خروجی تخمین زده شده

فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

1_5 نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، یک رویکرد فازی جدید جهت تشخیص خطای سیستم تعلیق قطار و سیستم ترمز قطار پیشنهاد شده است.

در فصل اول، مقدمه‌ای از اجزای مختلف سیستم تعلیق قطار با تمرکز بر سیستم ترمز و انواع آن ارائه شد. در فصل دوم مفاهیم کاربردی از خطا و واحد تشخیص خطا توصیف گردید.

در فصل سوم، رویکرد فازی T-S برای یک سیستم غیرخطی در حالت کلی پیشنهاد شد و ارائه اثبات پایداری برای رویکرد پیشنهادی تاکید بر ارزش پژوهش انجام شده را نمایان ساخت. رویکرد فازی ارائه شده برای مدل سیستم تعلیق قطار و سیستم ترمز آن در حضور خطا و اغتشاش خارجی طراحی گردید و ماتریسهای تنظیم آن توسط روش LMI محاسبه شد. لازم به ذکر است که هدف این تحقیق، تشخیص خطا می‌باشد لذا سیگنال‌های کنترل، بصورت آفلاین و از پیش تنظیم شده‌اند.

در فصل چهارم، رویکرد فازی پیشنهادی در حالت بدون خطا و در حضور انواع خطا برای سیستم‌های مذکور طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی، تخمین مطلوب حالت‌های سیستم را در حضور خطا و اغتشاش خارجی نشان داد. سیگنال مانده بین آستانه‌ی بالا و پایین از پیش تعریف شده قرار گرفته و هنگام وقوع خطا، بیرون زدگی از آستانه بیانگر وقوع خطا شد و از آنجا که واحد تشخیص خطای طراحی شده مقاوم بوده عملکرد سیستم مختل نمی‌شود و سیگنال مانده مجدداً در محدوده مجاز قرار گرفت. رویکرد عصبی طراحی شده نیز علی‌رغم تخمین خوب حالت‌های سیستم و تشخیص خطا، در مقایسه با رویکرد فازی پیشنهادی عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داد. همچنین گفتنی است که آنالیز پایداری واحد تشخیص خطای مبتنی بر رویکرد فازی پیشنهادی قوی‌تر از رویکرد عصبی بوده است.

۲_۵ پیشنهادات

در این بخش پیشنهاداتی به منظور رسیدن به نتایج بهتر و ارائه راهکارهایی برای تحقیقات و پژوهش های آینده بیان می گردد:

- ۱- واحد تشخیص خطا با وقوع خطای حسگر طراحی شود.
- ۲- علاوه بر تشخیص خطا، جداسازی در مواقع وقوع چند خطای همزمان مورد بررسی واقع شود تا بتوان عنصر معیوب را شناسایی و تعویض کرد.
- ۳- در این طرح از آستانه ثابت برای تشخیص خطا استفاده شده است؛ پیشنهاد می شود که آستانه بصورت تطبیقی طراحی گردد.

- [۱] ح. غ. و. ع. پرویزی، "لکوموتیو دیزل الکتریک، اجزا و مفاهیم"، انتشارات پندار پارس با همکاری شرکت مینا، ۱۳۹۱.
- [۲] I. Okamoto, "How Bogies Work," *Japanese Railw. Technol. Today*, p. ۵۲, ۲۰۰۱.
- [۳] D. o. t. A. T. Manual, "Operation and Maintenance of Diesel Electric Locomotives," *Dep. Air Force Tech. Order*, ۱۹۶۵.
- [۴] S. S. Kuruppu and A. Kulatunga, "Implementation and performance evaluation of a regenerative braking system coupled to ultracapacitors for a brushless DC hub motor driven electric tricycle," ۲۰۱۰.
- [۵] N. P. Amandus, "Locomotive Emissions Effects Due to Engine Configuration," *West Virginia Univ.*, ۲۰۰۳.
- [۶] J. E. Justus, "Control Means for Diesel Electric Locomotives," *U.S. Pat. ۲۴۳۴۴۱۳*, ۱۹۴۸.
- [۷] T. Shimizu, F. Application, P. Data, and P. E. Wright, "Power Transmission System," *U.S. Pat. ۰۰۲۵۱۳۲*, vol. ۲, no. ۱۲, ۲۰۱۱.
- [۸] D. Pamphlet, *Engineering design handbook analysis and design of automotive brake systems*. ۱۹۷۶.
- [۹] T. & Francis, "S. Iwnicki," *Army Mater. Dev. Readiness Command*, ۲۰۰۶.
- [۱۰] B. J. Breuer and K. H. Bill, *Brake Technology Handbook*. ۲۰۰۸.
- [۱۱] and H. T.) R. Sharma, P. Singh, P. Agarwal, "Automatic Braking System for Trains using Radio Frequency," *Int. J. Soft Comput. Eng.*, ۲۰۱۲.
- [۱۲] B. Zhang, "Modeling and Analysis of Hydraulic Energy Storage System for Hybrid Locomotives," ۲۰۱۰.
- [۱۳] E. Agenjos *et al.*, "Energy efficiency in railways: energy storage and electric generation in diesel electric locomotives," *IET Conf. Publ.*, pp. ۴۰۲-۴۰۲, ۲۰۰۹.
- [۱۴] F. C. Gamst, "Human Factors Analysis of the Diesel-Electric Locomotive Cab," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. ۱۷, no. ۲, pp. ۱۴۹-۱۵۶, ۱۹۷۵.
- [۱۵] S. K. Nguang, P. Zhang, and S. Ding, "Parity relation based fault estimation for nonlinear systems. An LMI approach," *Fault Detect. Superv. Saf. Tech. Process.* ۲۰۰۶, vol. ۱, pp. ۳۶۶-۳۷۱, ۲۰۰۶.
- [۱۶] S. K. Nguang, P. Zhang, and S. Ding, "Parity based fault estimation for nonlinear systems: An LMI approach," *Proc. ۲۰۰۶ Am. Control Conf.*, ۲۰۰۶.
- [۱۷] and O. H. Belle, P., Dominik Fussel, "Detection and isolation of sensor faults on nonlinear processes based on local linear models," *Proc. ۱۹۹۷*, vol. ۱, ۱۹۹۷.

- [18] P. Balle, D. Juricic, a. Rakar, and S. Ernst, "Identification of nonlinear processes and model based faultisolation using local linear models," *Am. Control Conf. 1997. Proc. 1997*, vol. 1, pp. 47-51, 1997.
- [19] and H. U. H. ZHANG, Zhan, H. U. Junda, "Parity Space Approach to Fault Detection based on Fuzzy Tree Model," *Int. J. Adv. Comput. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 607-660, 2013.
- [20] L. Li, S. X. Ding, Y. Yang, and Y. Zhang, "Robust fuzzy observer-based fault detection for nonlinear systems with disturbances," *Neurocomputing*, vol. 144, pp. 767-772, 2016.
- [21] H. Li, Y. Gao, P. Shi, and H. K. Lam, "Observer-Based Fault Detection for Nonlinear Systems with Sensor Fault and Limited Communication Capacity," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 61, no. 9, pp. 2745-2751, 2016.
- [22] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin, "Fault detection and isolation using sliding mode observer for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy model," *2008 17th Mediterr. Conf. Control Autom.*, pp. 287-291, 2008.
- [23] A. El Bakri and I. Boumhidi, "Fuzzy model-based faults diagnosis of the wind turbine benchmark," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 127, pp. 464-470, 2018.
- [24] D. Xu, B. Jiang, and P. Shi, "Nonlinear actuator fault estimation observer: An inverse system approach via a T-S fuzzy model," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 183-196, 2012.
- [25] Q. Wu and M. Saif, "A neural-fuzzy sliding mode observer for robust fault diagnosis," *Proc. Am. Control Conf.*, no. 1, pp. 4982-4987, 2009.
- [26] A. Mirzaee, A. Foruzantabar, A. Mirzaee, A. Foruzantabar, N. B. Design, and A. Fault, "Nonlinear-Fuzzy Based Design Actuator Fault Diagnosis for the Satellite Attitude Control System To cite this version : HAL Id : hal-01066071," 2017.
- [27] L. Li, S. X. Ding, J. Qiu, Y. Yang, and Y. Zhang, "Weighted fuzzy observer-based fault detection approach for discrete-time nonlinear systems via piecewise-fuzzy lyapunov functions," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 1320-1333, 2016.
- [28] J. Li, Z. Wang, Y. Shen, and Y. Wang, "Zonotopic fault detection observer design for Takagi-Sugeno fuzzy systems," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 49, no. 10, pp. 3216-3230, 2018.
- [29] H. Sedigh Ziyabari and M. Aliyari Shoorehdeli, "Fuzzy robust fault estimation scheme for a class of nonlinear systems based on an unknown input sliding mode observer," *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 24, no. 10, pp. 1871-1873, 2018.

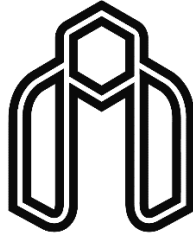
- [30] Y. Wu, B. Jiang, and P. Shi, "Incipient fault diagnosis for T-S fuzzy systems with application to high-speed railway traction devices," *IET Control Theory Appl.*, vol. 10, no. 17, pp. 2286–2297, 2016.
- [31] G. B. Anderson, D. H. Stone, J. E. Cline, and R. L. Smith, "New detection technique to identify defective railroad bearings," *Am. Soc. Mech. Eng. Rail Transp. Div. RTD*, vol. 12, pp. 31–33, 1996.
- [32] J. E. Cline, J. R. Bilodeau, and R. L. Smith, "Acoustic wayside identification of freight car roller bearing defects," *Proc. 1998 ASME/IEEE Jt. Railr. Conf.*, pp. 79–83, 1998.
- [33] J. Yohso, "Development of Automatic Ultrasonic Testing Equipment for General and Bogie Inspection of Shinkansen Hollow Axle," *Proc. 11th Int. Wheel. Congr. Natl. Conf. Aust.*, 1990.
- [34] M. Jesussek and K. Ellermann, "Fault detection and isolation for a railway vehicle by evaluating estimation residuals," *Procedia IUTAM*, vol. 13, pp. 14–23, 2010.
- [35] M. Jesussek and K. Ellermann, "Fault Detection and Isolation for a Nonlinear Railway Vehicle Suspension System," *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 443–458, 2010.
- [36] H. Zhang, Y. Xie, and Z. Long, "Fault detection based on tracking differentiator applied on the suspension system of maglev train," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2010, 2010.
- [37] Y. Hayashi, H. Tsunashima, and Y. Marumo, "Fault detection of railway vehicle suspension systems using multiple-model approach," *J. Mech. Syst. Transp. Logist.*, vol. 1, no. 1, pp. 88–99, 2008.
- [38] X. Wei, K. Guo, L. Jia, G. Liu, and M. Yuan, "Fault Isolation of Light Rail Vehicle Suspension System Based on D-S Evidence Theory and Improvement Application Case," *J. Intell. Learn. Syst. Appl.*, vol. 10, no. 04, pp. 240–253, 2013.
- [39] L. H. Liu, X. K. Wei, and X. H. Liu, "Residual fault detection filter design in the finite frequency domain based on LMI optimization," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 494–495, 2014.
- [40] Z. Mao, Y. Wang, B. Jiang, and G. Tao, "Fault diagnosis for a class of active suspension systems with dynamic actuators' faults," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 14, no. 0, pp. 1160–1172, 2016.
- [41] X. Wei, Y. Guo, L. Jia, and H. Liu, "Fault detection of rail vehicle suspension system based on CPCA," *Conf. Control Fault-Tolerant Syst. SysTol*, pp. 700–705, 2013.
- [42] M. Witczak, *Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-Linear Systems*, vol. 304, 2007.

- [٤٣] K. Patan, “Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes,” *Springer, India, Sci. Publ. Serv.*, vol. ٣٧٧, ٢٠٠٨.
- [٤٤] R. Isermann, “Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance - Rolf Isermann - Google Books,” *Springer Sci. Bus. Media*, ٢٠٠٦.
- [٤٥] H. Alwi, C. Edwards, and C. Pin Tan, “Fault Detection and Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes,” *Fault Detect. Fault-Tolerant Control Using Sliding Modes*, pp. ٧-٢٧, ٢٠١١.
- [٤٦] Youmin and Jin, “Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems,” *Annu. Rev. Control*, vol. ٣٢, no. ٢, pp. ٢٢٩-٢٥٢, ٢٠٠٨.
- [٤٧] J. Chen and R. J. Patton, “Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems,” *Springer Sci. Bus. Media*, vol. ٣, ٢٠١٢.
- [٤٨] A. Garza-Castañón, L. E., & Vargas-Martínez, *Artificial Intelligence Methods in Fault Tolerant Control, Chapter of Book Automation and Control-Theory and Practice*. Austria, ٢٠٠٩.
- [٤٩] M. Kowal, “Robust fault detection using neuro-fuzzy networks,” p. ١٨٣٢, ٢٠٠٥.
- [٥٠] J. Patton, R. J., Chen, J., & Chen, “A study on neuro-fuzzy systems for fault diagnosis. International,” *J. Syst. Sci.*, ٢٠٠٠.
- [٥١] J. Chen and R. J. Patton, “Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems,” *Springer Sci. Bus. Media*, vol. ٣, ١٩٩٩.
- [٥٢] A. Khan and S. Kumar, “T-S fuzzy observed based design and synchronization of chaotic and hyper-chaotic dynamical systems,” *Int. J. Dyn. Control*, vol. ٦, no. ٣, pp. ١٤٠٩-١٤١٩, ٢٠١٨.
- [٥٣] E. G. Nobrega, M. O. Abdalla, and K. M. Grigoriadis, “LMI-based filter design for fault detection and isolation,” *Mech. Eng.*, vol. ٥, pp. ١-٦, ٢٠٠٠.
- [٥٤] J. R. Zhang and S. J. Xu, “Nonlinear observer design for automatic steering of vehicles,” *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, vol. ٢٠٠٢-Janua, pp. ١٧٩-١٨٢, ٢٠٠٢.
- [٥٥] R. Liu and I. M. Golovitcher, “Energy-efficient operation of rail vehicles,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. ٣٧, no. ١٠, pp. ٩١٧-٩٣٢, ٢٠٠٣.
- [٥٦] X. Wen, X. Zhang, and W. Zhang, “Design of fault detection observer based on new-type neural networks,” *٩th Int. Conf. Instrum. Meas. Comput. Commun. Control. IMCCC ٢٠١٥*, pp. ٣٢٦-٣٢٩, ٢٠١٥.

Abstract

The goal of this thesis is to design the robust model-free observer for detecting the fault existed in the suspension and brake railway (Diesel Electric) system in the presence of external disturbances. In this thesis, the fault detection unit is developed based on TSK fuzzy observer to estimate and detect the fault occurred in the system. Moreover, residual signal is robust against the fault and disturbance signal. Stability of the overall system is derived to guarantee the convergence of the error estimation to zero. In order to show the capability of the proposed method, the fuzzy observer is designed for both suspension and brake systems. In addition, a neural observer based on Leunberger method is designed for brake system of the train.

Keywords: Fault detection; Robust residual signal; Fuzzy observer; Stability analysis; Railway brake system.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical & Robotic Engineering

**Robust Residual Generation for The Fault Detection using a Fuzzy
Observer in a Train Braking System**

Ehsan Panahi

Supervisor:
Dr. Mohammad Ali Sadrnia

January 2019