

## عیب‌یابی تجهیزات سیگنالینگ خطوط ریلی با استفاده از روش‌های نوین به منظور افزایش ایمنی سیر و حرکت

مهدی دهقانی<sup>۱</sup>، محمد علی صندیزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران mehdy\_iust@yahoo.com  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران sandidzadeh@iust.ac.ir

### چکیده

یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های ریلی عملکرد این سیستم‌ها با قابلیت اعتماد، قابلیت دسترس‌پذیری، قابلیت تعمیرپذیری و ایمنی (RAMS<sup>۱</sup>) بالا می‌باشد که سطح RAMS مورد انتظار نیز بطور مداوم در حال افزایش است. یک روش متداول برای اطمینان از سطح بالای RAMS سیستم، بکارگیری سیستم‌های پایش وضعیت، تشخیص و آشکارسازی عیب می‌باشد. با استفاده از این تکنیک‌ها، امکان بازرسی وضعیت تجهیزات بدون ایجاد اختلال در عملکرد آنها فراهم شده و بروز خرابی و یا نزدیک شدن تجهیز به وضعیتی که بروز خرابی فریب‌الوقوع است، تشخیص داده می‌شود. وجود چنین قابلیت‌هایی باعث افزایش قابلیت اعتماد عملکرد تجهیزات و فرآیندها گشته و همچنین با اتخاذ سیاست‌های صحیح تعمیر و نگهداری و انجام عملیات‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه طول عمر تجهیزات نیز افزایش خواهد یافت. در این مقاله روشی برای آشکارسازی و تشخیص عیوب یک مدار راه فرکانس صوتی ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی، یک تکنیک کمی/کیفی هیبرید را که تحت عنوان سیستم فازی-عصبی شناخته می‌شود، بکار می‌گیرد. چنین سیستم تشخیص عیبی مزایای منطق فازی و شبکه‌های عصبی (یعنی قابلیت تعامل با داده‌های با دقت پایین در شبکه‌های فازی و فرآیند یادگیری شبکه‌های عصبی) را با هم ترکیب نموده و از آن استفاده می‌کند. برای تحقق این امر، یک نمونه مدار راه فرکانس صوتی با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری، شبیه‌سازی شده و با اعمال داده‌های مربوط به عملکرد بدون عیب و عملکرد معیوب آن به شبکه‌ی هوشمند، الگوریتم طراحی شده آموزش داده می‌شود. با وقوع هر مد خرابی در سیستم و یا نزدیک شدن سیستم به یک مد خرابی، الگوریتم طراحی شده، نوع خرابی و محل آن را اعلام می‌دارد.

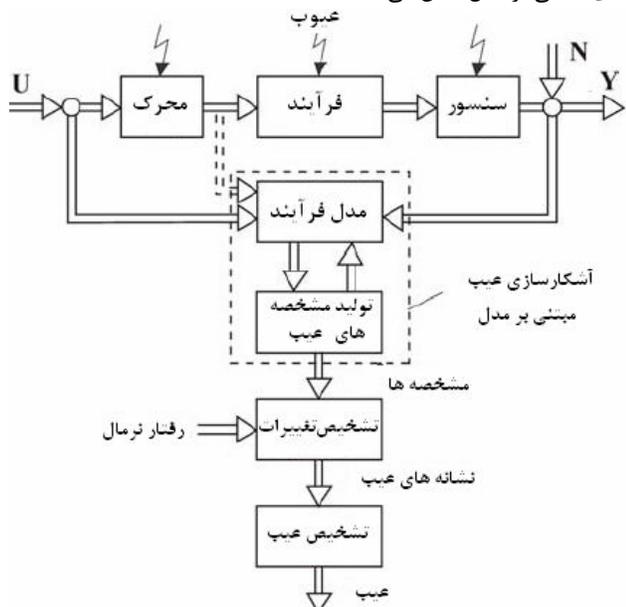
**کلمات کلیدی:** تشخیص عیب، آشکارسازی عیب، شبکه‌های عصبی، سیستم‌های فازی.

### ۱- مقدمه

در سیستم‌های ریلی پیشرفته‌ی امروزی نیز می‌توان مدار راه‌ها را به عنوان اصلی‌ترین تجهیزات برای تشخیص قطار دانست. یک دسته‌ی پر استفاده از این نوع تجهیزات، مدارات راه فرکانس صوتی می‌باشند. اصول عملکرد یک مدار راه فرکانس صوتی همانند مدار راه‌های DC و AC می‌باشد با این تفاوت که برای ایزوله نمودن مدار راه‌های مجاور، نیازی به بریدن ریل‌ها و قرار دادن صفحات عایقی نیست. از این رو استفاده از این تجهیزات، در خطوط ریلی الکتریکی بسیار مورد توجه می‌باشد. از آنجا که عملکرد ایمن یک مدار راه، در ایمنی سیر و حرکت اهمیت بسزایی داراست، طراحی این تجهیزات بصورت خراب-ایمن می‌باشد و بروز هرگونه عیب در این تجهیزات سبب اشغال اعلام شدن خط می‌گردد. خاصیت خراب-ایمن بودن مدار راه، پتانسیل ایجاد تاخیرات قابل توجهی را در شبکه، در صورت بروز عیب در این عنصر، داراست. بنابر گزارشات راه‌آهن انگلستان، تا سال ۲۰۰۵ در حدود ۵۰۰۰۰ مدار راه در حال کار در خطوط اصلی راه‌آهن انگلیس وجود داشت. در طی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ بالغ بر ۱۲۰۰۰ خرابی مربوط به مدار راه‌ها در انگلستان گزارش شده، که در نتیجه‌ی آنها ۱،۵ میلیون دقیقه تاخیر روی داده است. بنابراین می‌توان گفت که توانایی آشکارسازی و تشخیص عیوب به منظور فراهم نمودن امکان پاسخ‌دهی سریع، در مواقع بروز حادثه/خرابی مزایای اقتصادی مهمی را داراست. یکی از مهمترین مزایای یک سیستم قوی پایش وضعیت، ایجاد توانایی آشکارسازی و تعیین محل عیب و پیش‌بینی عیوب اولیه می‌باشد که از آسیب‌های بعدی جلوگیری خواهد نمود. در این روش می‌توان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه را پیش از خرابی کلی سیستم انجام نمود [۱]. تشخیص و آشکارسازی عیوب بوسیله‌ی پایش وضعیت یک زمینه‌ی فعال تحقیقاتی آکادمیک از ۱۹۷۰ می‌باشد و در طی این سال‌ها روش‌های زیادی که عمدتاً مبتنی بر مدل می‌باشند ارائه گردیده است. یک راه‌حل دیگر برای تعیین یک مدل برای تشخیص

<sup>1</sup> Reliability, Accessibility, Maintainability, Safety

پارامترها [۳]. شکل ۱ چگونگی تشخیص عیب را بوسیله‌ی روش-های مبتنی بر مدل نشان می‌دهد.



شکل ۱- تشخیص عیب بوسیله روش‌های مبتنی بر مدل

یکی از عیوب عمده‌ی روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر مدل که بر اساس تکنیک‌های مهندسی کنترل بنا شده‌اند، نیاز این روش‌ها به صرف وقت و انرژی زیاد به منظور تولید یک مدل بهینه از سیستم تحت بررسی می‌باشد. این مشکل در صورت مواجه شدن با سیستم-های غیر خطی دو چندان شده و در بعضی از مواقع امکان نیز استفاده از این روش‌ها غیر ممکن خواهد بود. از آنجا که بسیاری از سیستم‌های مهندسی ذاتا غیرخطی هستند در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی بر روی FDI سیستم‌های غیر خطی انجام شده است و به دلیل اثبات کارآمدی تکنیک‌های محاسبه‌ی نرم از قبیل منطق فازی (FSS)، شبکه‌های عصبی (NNs) و الگوریتم ژنتیک (GAs) برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده و غیر خطی این تکنیک‌ها به منظور توسعه‌ی تکنیک‌های FDI برای چنین سیستم-هایی، بصورت گسترده‌ای بکار گرفته شده‌اند [۴] و [۵]. سیستم‌های فازی بوسیله‌ی تعریف ورودی و خروجی‌های مبهم و نادقیق بر حسب متغیرهای فازی و توابع عضویت، قابلیت انجام عملیات را باوجود اطلاعات نادقیق، دارا می‌باشند. در این سیستم‌ها می‌توان فرآیندهای غیر خطی پیچیده را به صورت عبارات زبانی و بدون نیاز به شناخت دقیق عناصر غیر خطی سیستم، توصیف نمود. شبکه‌های عصبی توانایی تقریب توابع غیر خطی را با دقت دلخواه دارا می‌باشند و همچنین می‌توان این شبکه‌ها را با داده‌های ورودی-خروجی قبلی آموزش داد. آموزش این شبکه‌ها با تغییر وزن‌های شبکه انجام می‌گردد، که در طی آن با اعمال داده‌های جدید به شبکه، وزن‌های جدید محاسبه شده و تصحیحات لازم انجام می‌گردد. الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های بهینه‌سازی و جستجوی قدرتمندی هستند که عموما در سیستم‌های پیچیده و با خاصیت غیر خطی بالا بکار گرفته می‌شوند. شبکه‌های فازی و عصبی را می‌

خطا استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی از قبیل سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی می‌باشد که در این مقاله سعی شده است با شبیه‌سازی یک مدار راه فرکانس صوتی و جمع‌آوری داده‌های مربوط به آن یک مدل تشخیص عیب برای استفاده در مورد مدار راه‌های فرکانس صوتی، پیشنهاد گردد.

## ۲- انواع روش‌های تشخیص عیب

از آنجا که آشکارسازی و ایزولاسیون عیب<sup>۱</sup> (FDI) نقش بسزایی در بهبود قابلیت اعتماد و ایمنی سیستم‌های مهندسی داراست، توجه به آن در چند دهه‌ی گذشته رشد چشمگیری دارا بوده است. هدف اساسی از بکارگیری تکنیک‌های FDI فراهم نمودن امکان تشخیص عیوب در مراحل اولیه می‌باشد تا با انجام اقدامات کنترلی موثر از بروز وقفه در سرویس‌دهی سیستم‌ها به دلیل از کارافتادگی جلوگیری به عمل آید. از آنجا که در حال حاضر بصورت مداوم پیچیدگی‌های سیستم‌های مختلف در حال افزایش می‌باشد، تکیه به دانش اپراتوری برای تشخیص و آشکارسازی عیوب، چندان قابل اطمینان نبوده و از این رو تقاضا برای روش‌ها و تکنیک‌های هوشمند و یا اتوماتیک تشخیص عیب، بصورت گسترده در حال افزایش می‌باشد.

با بررسی سیر تاریخی تکامل روش‌های تشخیص عیب می‌توان این روش‌ها و تکنیک‌ها را بصورت دو رویکرد عمده تقسیم‌بندی نمود. رویکرد اول مبتنی بر مهندسی کنترل و رویکرد دوم مبتنی بر علوم کامپیوتر می‌باشد. در رویکرد مبتنی بر مهندسی کنترل از تکنیک‌های توسعه یافته توسط تئوری کنترل مانند روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر استفاده می‌گردد [۲]. در رویکرد مبتنی بر علوم کامپیوتر از تکنیک‌های توسعه یافته در زمینه‌ی هوش مصنوعی از قبیل روش‌های تشخیص مبتنی بر منطق فازی-عصبی استفاده می‌شود.

روش‌های FDI را می‌توان به دو دسته‌ی مبتنی بر مدل و بدون مدل نیز دسته‌بندی نمود. در روش بدون مدل از ایده‌ی افزونگی سخت‌افزاری<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. در این روش، تجهیزات سخت افزاری بصورت اضافی نصب گردیده و با تشخیص عدم تطابق بین خروجی‌های آنها بروز عیب تشخیص داده می‌شود. مشکل اساسی این روش هزینه‌ی بالای تامین سخت افزار اضافی و سنسورهای مربوطه می‌باشد.

در روش‌های مبتنی بر مدل، در اولین قدم، مدل سیستم تولید می‌شود. این مدل، روابط تحلیلی و عملکردی بین متغیرهای ورودی و خروجی سیستم را بیان می‌کند. وجود تفاوت بین خروجی‌های سیستم واقعی و خروجی‌های مدل اطلاعات لازم را برای آشکارسازی و ایزولاسیون عیب در سیستم فراهم می‌کند. برخی از روش‌های کمی شناخته شده‌ی FDI مبتنی بر مدل عبارتند از: روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر، وابستگی پرتی و تخمین

<sup>1</sup> Fault Detection and Isolation

<sup>2</sup> hardware redundancy

- فازی‌سازی: تبدیل ورودی‌ها به مجموعه‌های فازی بوسیله‌ی توابع عضویت.
- تکثیر: برای محاسبه‌ی حاصل ضرب کلیه‌ی سیگنال‌های ورودی بمنظور نمایش قدرت آتش قوانین فازی.
- نرمال‌سازی: برای نرمال‌سازی قدرت آتش بوسیله‌ی محاسبه‌ی نسبت قدرت آتش هر قانون به مجموع قدرت آتش کلیه‌ی قوانین.
- غیر فازی‌سازی: بمنظور غیر فازی‌سازی بوسیله‌ی عملیات‌های قوانین فازی.
- جمع‌بندی: بمنظور دستیابی به یک خروجی کلی بصورت مجموع کلیه‌ی سیگنال‌های ورودی.

#### ۴- مدار راه فرکانس صوتی

مدار راه تجهیززی است که توسط آن وجود قطار در یک بلاک تشخیص داده می‌شود. در حال حاضر در خطوط ریلی از مدار راه-های مختلفی از جمله مدار راه‌های AC، DC، فرکانس صوتی و ایمپالسی استفاده می‌گردد. اصول عملکرد کلیه‌ی این تجهیزات یکسان می‌باشد، بدین صورت که یک جریان الکتریکی بوسیله‌ی فرستنده وارد یکی از ریل‌ها می‌گردد؛ جریان مذکور مسیر بین فرستنده و گیرنده را از داخل یکی از ریل‌ها طی کرده و سپس با عبور از داخل فرستنده از طریق ریل دیگر به فرستنده بازگشته و مسیر مدار بسته می‌شود. جریان الکتریکی در حین عبور از فرستنده یک رله را تحت عنوان رله‌ی خط تحریک می‌نماید که تحریک رله و بسته شدن کنتاکت آن به منزله‌ی آزاد بودن خط می‌باشد. در صورتیکه قطار وارد بلاک گردد، جریان الکتریکی توسط چرخ و محور قطار اتصال کوتاه شده و گیرنده از مدار خارج می‌گردد، در این وضعیت، تحریک رله‌ی خط قطع شده و باز شدن رله به منزله‌ی اشغالی خط خواهد بود. در مدار راه‌های DC و AC به منظور جداسازی مدار راه‌های مجاور لازم است، ریل‌ها قطع شده و بین آنها صفحات عایقی تحت عنوان مفصل‌های جداساز قرار گیرد؛ ولی در مدارات راه فرکانس صوتی با اتصال سلف‌ها و خازن‌هایی به ریل، ایزولاسیون لازم به صورت الکتریکی انجام می‌گردد و نیاز به قطع ریل‌ها نخواهد بود. در این مقاله یک مدار راه فرکانس صوتی تحت عنوان TI21 بوسیله‌ی نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی گردیده است.

#### ۵- ساختار و چگونگی عملکرد مدار راه TI21

در حال حاضر شرکت‌های مختلفی در دنیا مدار راه‌های فرکانس صوتی مختلفی را تولید می‌نمایند. یک نمونه از این مدار راه‌ها، مدار راه TI21 می‌باشد که توسط شرکت ADtranz تولید می‌گردد. این مدار راه در مقایسه با دیگر انواع مدارات راه ساختار ساده‌تری دارد. قسمت‌های اصلی این مدار راه شامل موارد زیر می‌باشند:

- ۱- فرستنده
- ۲- واحد تنظیم‌سازی (tuning unit)
- ۳- ناحیه تنظیم شده (tuned area)
- ۴- خط انتقال (خط ریلی)

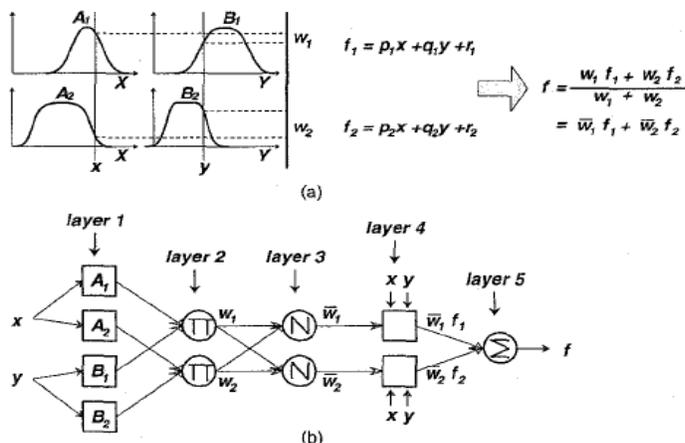
توان بعنوان تقریب‌زن‌های فراگیر در نظر گرفت، در حالیکه الگوریتم‌های ژنتیک را می‌توان برای بهینه‌سازی ساختار شبکه‌های عصبی و فازی بکار گرفت. همچنین می‌توان GAS را برای تنظیم توابع عضویت شبکه‌های فازی و آموزش وزن‌ها در شبکه‌های عصبی بکار گرفت. این تکنیک‌ها و یا ترکیب آن‌ها تقریب‌های خوبی را برای توابع غیر خطی فراهم می‌کنند. یکی از پر قدرت‌ترین و پر کاربردترین تکنیک‌های ترکیب روش‌های محاسباتی نرم، تکنیک ترکیب منطق فازی و شبکه‌ی عصبی می‌باشد که تحت عنوان شبکه‌های فازی-عصبی (NFNs) نامیده می‌شود.

یک FS توانایی توصیف روابط غیر خطی بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم را بر حسب قوانین زبانی اگر-آنگاه داراست. با این حال تعیین بهترین مجموعه‌ی قوانین برای یک سیستم پیچیده، مشکل و زمان‌گیر خواهد بود. در مقابل یک شبکه‌ی عصبی قابلیت تقریب زدن توابع غیر خطی را با دقت دلخواه، دارا بوده و توانایی یادگیری بالایی را داراست که به همین جهت می‌توان آن را برای تنظیم یک سیستم فازی بکار گرفت. این خاصیت، یک ابزار بسیار قوی را برای مدل‌سازی و کلاس‌بندی مسائل FDI فراهم می‌نماید. در این مقاله از یک شبکه‌ی فازی-عصبی، تحت عنوان ANFIS برای تشخیص عیوب استفاده شده است که در ادامه به معرفی این تکنیک پرداخته خواهد شد.

#### ۳- تکنیک فازی-عصبی ANFIS

Jang (۱۹۹۴) یک ساختار سیستم استنتاج شبکه-فازی تطبیقی (ANFIS) را پیشنهاد کرد که امکان انطباق یک مجموعه از پارامترهای مدل را بوسیله‌ی قوانین یادگیری، فراهم می‌نماید. نمودن سیستم استنتاج فازی به داخل شبکه‌ی عصبی، اجازه‌ی بکارگیری قوانین فازی و قابلیت فراگیری در حین بکارگیری داده-های تست را برای بهبود عملکرد سیستم فراهم می‌نماید. در حقیقت این سیستم از یک سیستم کنترل فازی سوگنو ( Sugeno fuzzy system) تشکیل شده که ساختار آن بصورت یک شبکه در آمده و قابلیت بکارگیری الگوریتم‌های یادگیری مانند back propagation بر روی آن وجود دارد. شکل ۲ یک نمونه از این سیستم‌ها را با دو ورودی نشان می‌دهد [۶].

سیستم فازی-عصبی فرآیندهای زیر را اجرا می‌کند:



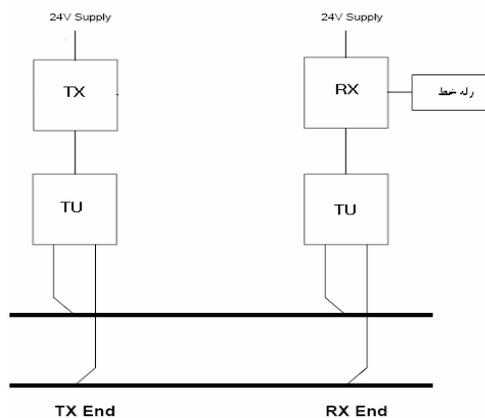
شکل ۲- سیستم کنترل فازی سوگنو

#### ۵- گیرنده ۶- منبع تغذیه ۷- رله‌ی خط

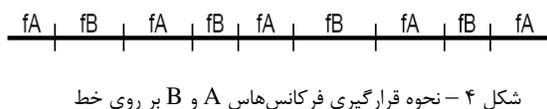
این نوع مدار راه قابلیت عملکرد در دو مد توان نرمال و مد توان پایین را داراست. مد توان پایین در طول‌های ۵۰ تا ۲۵۰ متر و مد توان نرمال در طول‌های ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدار راه TI21 از ۸ باند فرکانس صوتی که در بازه‌ی ۱۵۴۹ هرتز تا ۲۵۹۳ هرتز قرار دارند، استفاده شده است. هر یک از این باندهای فرکانسی بوسیله‌ی A تا H نشان داده می‌شوند. این فرکانس‌ها بصورت دو به دو ۴ جفت را تشکیل می‌دهند که در یک خط معمولاً از یک جفت از این فرکانس‌ها استفاده می‌شود. این جفت‌ها بصورت A/B, C/D, E/F و G/H می‌باشند. استفاده از بیش از دو فرکانس بر روی یک خط مستلزم بکارگیری مفصل‌های ایزوله کننده می‌باشد. معمولاً جفت‌های A/B و C/D بعنوان باندهای فرکانسی مطلوب برای خطوط دوبل در نظر گرفته می‌شوند. باندهای E/F و G/H تنها زمانی که آرایش‌های بیش از دو خط مورد استفاده قرار گرفته، بکار برده می‌شوند. این چیدمان نیاز به قطعات یدکی و امکانات انبارداری را کاهش می‌دهد. در این مقاله یک مدار راه با مد توان نرمال و طول ۴۰۰ متر با فرکانس A (۱۶۹۹ هرتز) شبیه‌سازی شده است. [۷]

#### ۵-۱- چیدمان اجزا

چیدمان اجزا یک مدار راه به صورت ساده در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۴ نیز چگونگی قرار گرفتن فرکانس‌های A و B را بر روی یک خط نشان می‌دهد.



شکل ۳ - چیدمان اجزا یک مدار راه



شکل ۴ - نحوه قرارگیری فرکانس‌های A و B بر روی خط

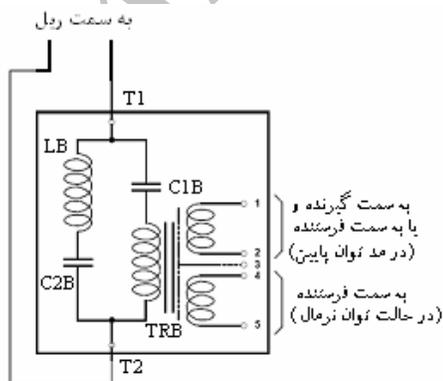
سینوسی با فرکانس ۱۶۹۹ هرتز تولید می‌گردد. فرکانس موج مربعی نیز در کلیه‌ی فرستنده‌ها ۴.۸ هرتز می‌باشد. در فرستنده توسط یک مدولاتور این موج‌ها با هم ترکیب شده و یک موج سینوسی با مدولاسیون FSK تولید می‌گردد. موج حاصل دارای فرکانس حامل ۱۶۹۹ هرتز می‌باشد که در بازه‌ی مثبت و منفی ۱۷ هرتز با نرخ ۴.۸ هرتز در حول فرکانس موج حامل تغییر می‌کند. شکل ۵ این سیگنال را نشان می‌دهد. این موج از طریق کابل رابط به TU ارسال شده و از آنجا به ریل اعمال می‌گردد. فرستنده در مد نرمال حداکثر توان ۴۰ وات را به ریل‌ها اعمال می‌کند.

#### ۵-۳- گیرنده

در ورودی گیرنده یک ترانسفورماتور قرار داده شده است که بوسیله‌ی تغییر نسبت دور آن حساسیت گیرنده تنظیم می‌گردد. مدار گیرنده دارای دو شاخه‌ی اصلی می‌باشد که در یک شاخه فیلترهای مربوط به فرکانس ۱۷۱۶ هرتز و در شاخه‌ی دیگر فیلترهای مربوط به فرکانس ۱۶۸۲ قرار دارند. سیگنال ورودی پس از گذر از ترانسفورماتور ورودی در این شاخه‌ها در دو مرحله فیلتر شده و توسط یک دمدمولاتور موج مربعی ۴.۸ هرتز در هر دو شاخه در فاز مخالف تولید می‌گردد. این دو موج با یکدیگر جمع شده و یک ولتاژ DC ثابت را تولید می‌کنند. در صورتیکه هر دو موج مربعی بطور مداوم و در فاز مخالف موجود باشند، ولتاژ DC تولیدی ثابت خواهد بود. در صورتیکه ولتاژ DC تولیدی بمدت ۲ ثانیه بدون تغییر وجود داشته باشد، رله‌ی خط توسط راه‌انداز آن انرژی‌دار می‌گردد.

#### ۵-۴- واحد تنظیم‌سازی (TU)

به منظور تطبیق امپدانس و تغذیه‌ی ریل‌ها و همچنین اضافه نمودن سلف‌ها و خازن‌های مورد نیاز برای ایجاد ایزولاسیون بین دو مدار راه مجاور از TUها استفاده می‌گردد. شکل ۶ مدار داخلی یک واحد تنظیم‌سازی را نشان می‌دهد.



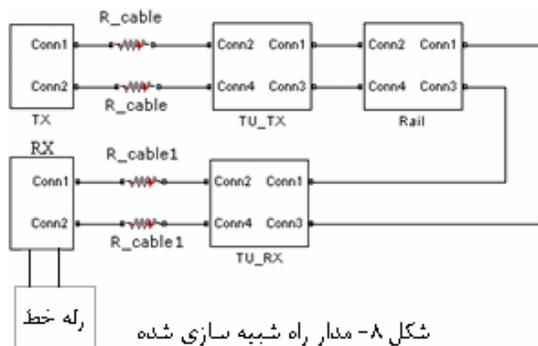
شکل ۶- مدار داخلی واحد تنظیم‌سازی

#### ۶- شبیه‌سازی مدار راه

فرستنده‌ی این مدار راه دارای یک اسیلاتور موج سینوسی و یک اسیلاتور موج مربعی می‌باشد. در فرستنده فرکانس A موج

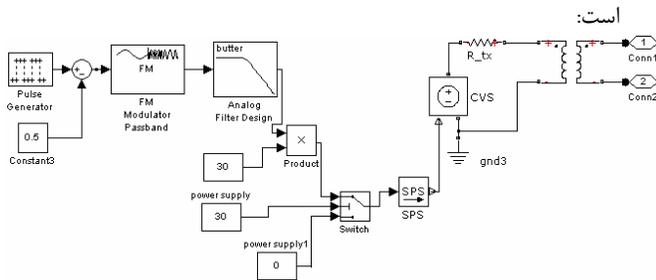
#### ۵-۲- فرستنده

فرستنده‌ی این مدار راه دارای یک اسیلاتور موج سینوسی و یک اسیلاتور موج مربعی می‌باشد. در فرستنده فرکانس A موج



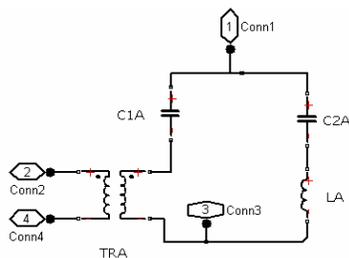
شکل ۸- مدار راه شبیه سازی شده

مدار شبیه سازی شده بلوک فرستنده در شکل ۹ نشان داده شده



شکل ۹- مدار شبیه سازی شده فرستنده

مدار شبیه سازی شده TU ها بصورت شکل ۱۰ می باشد. Conn1 و Conn3 به ریل و Conn2 و Conn4 به کابل فرستنده و یا گیرنده متصل می گردند.



شکل ۱۰- مدار شبیه سازی شده واحد تنظیم سازی

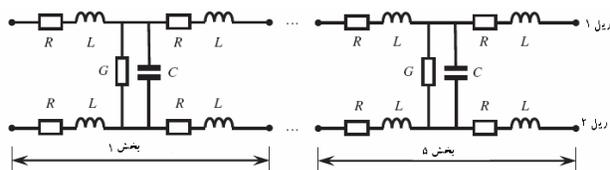
برای شبیه سازی ریل فرض شده است که مدار راه از هر دو سمت با مدار راه های دیگری مجاور است. به همین دلیل در بلوک مربوط به ریل امپدانس مربوط به ۲۰ متر ریل ناحیه ی تنظیم شده، لحاظ گردیده و سلف و خازن موجود در tu مدار راه های مجاور نیز به مدار اضافه شده اند (شکل ۱۱).

مدار گیرنده در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

ترکیب عناصر توزیع شده و مجتمع تشکیل شده است، مدل نمود. عناصر توزیع شده برای قسمتی از خط که در داخل مدار راه قرار می گیرد، استفاده می شود. عناصر مجتمع همانند مقاومت ها و القاگرها نقاط انتهایی مدار راه را نشان می دهند. مدل خط انتقال دو خطی متقارن برای مدلسازی سیستم های سیگنالینگ مناسب می باشد. [۸]

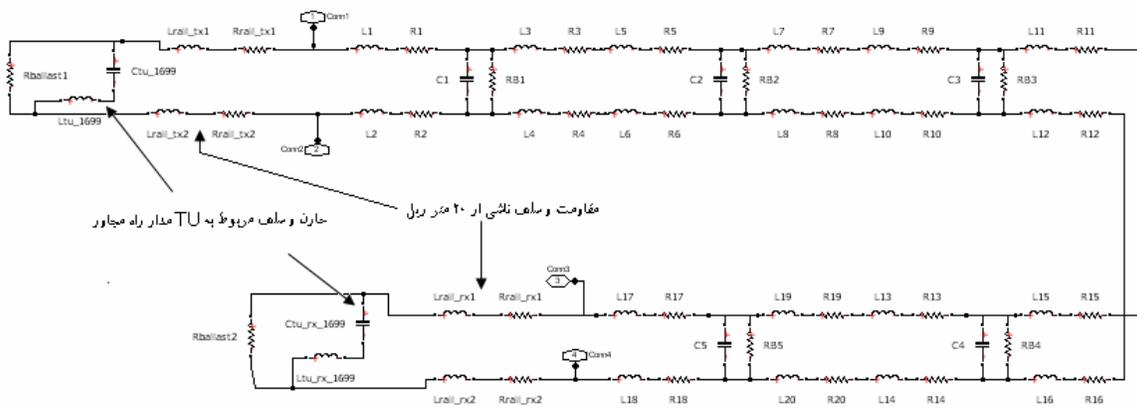
Hill, R. J., Carpenter, D. C., & Tasar, T. (۱۹۸۹) پارامترهای مربوط به یک خط نوعی را اندازه گیری نمودند. در حقیقت این مدل برای نشان دادن مد تفاضلی تحریک جایگه جریان مدار راه در طول یک ریل جریان یافته و از طریق ریل دیگر باز می گردد، کافی می باشد. [۹]

جایگزینی مدل خط انتقال با اتصال آبشاری بخش های مشابه، سیستم را ساده تر می کند. یک مدار راه ۴۰۰ متری از ۳۸۰ متر خط که در داخل مدار راه قرار گرفته و همچنین دو بخش ۲۰ متری که در بین TU های دو مدار راه مجاور قرار می گیرند، تشکیل شده است. شکل ۷ یک خط به طول ۳۸۰ متر را نشان می دهد که بوسیله ۵ بخش تقریب زده شده است. تعداد بخش ها میزان خطای بین رفتار خط انتقال و مدل پارامتر مجتمع را مشخص می کند. مقاومت R و القاگر L امپدانس ریل و رسانایی G و خازن C ادمیتانس بالاست را نشان می دهند. برای یک مدار راه خاص، مقادیر عناصر سری (R و L) ذاتا ثابت و مشخص هستند، در حالیکه رسانایی و خازن (G و C) به شدت به شرایط محیطی و وضعیت خط وابسته هستند. شکل ۷ جایگزینی بخش های مشابه را برای شبیه سازی ریل نشان می دهد. [۱۰]

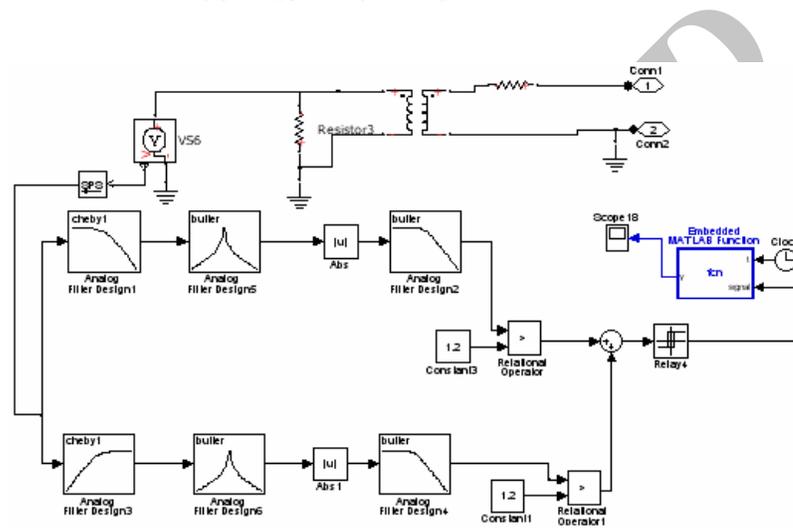


شکل ۷- جایگزینی عناصر الکتریکی برای شبیه سازی ریل

شبیه سازی خط ریلی بکمک جعبه ابزار simscap نرم افزار MATLAB انجام شده است. شکل ۸ مدار راه شبیه سازی شده را نشان می دهد. بلوک TX نشان گر فرستنده، TU\_TX نشان گر واحد تنظیم سازی مربوط به فرستنده، Rail نشان گر ۳۸۰ متر ریل، TU\_RX نشان گر واحد تنظیم سازی مربوط به گیرنده و RX نشان گر واحد گیرنده می باشد. مقاومت مجاز کابل رابط بین TX و TU\_TX برابر ۰.۵ اهم می باشد و همچنین مقاومت مجاز کابل رابط RX و TU\_RX برابر ۷ اهم می باشد که هر دو مقدار در شبیه سازی ها لحاظ شده اند.



شکل ۱۱- مدار شبیه‌سازی شده ریل



شکل ۱۲- مدار شبیه‌سازی شده گیرنده

- ۳- قطع شدن کابل بین گیرنده و رله‌ی خط موجود در اتاق رله
- ۴- خرابی واحد تنظیم‌سازی مربوط به فرستنده و یا قطعی کابل آن
- ۵- خرابی واحد تنظیم‌سازی مربوط به گیرنده و یا قطعی کابل آن
- ۶- شکستگی ریل

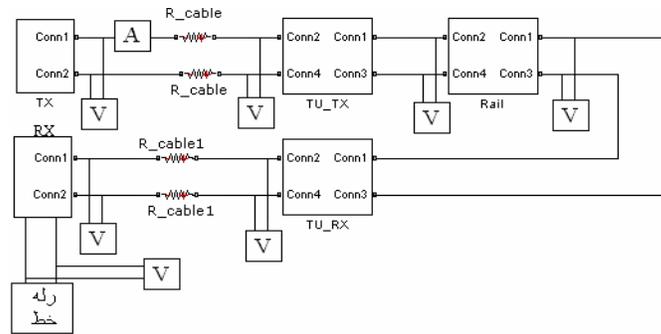
به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به وقوع خطاها، سنسورهایی به مدار راه اضافه می‌گردد. بسته به نوع و تعداد خطاهایی که قصد تشخیص آنها وجود دارد، تعداد و محل قرارگیری سنسورها متفاوت خواهد بود. شکل ۱۳ محل قرارگیری سنسورها را نشان می‌دهد. برای شناسایی عیوب مورد نظر به ۷ سنسور ولتاژ و یک سنسور جریان نیاز می‌باشد. ولتاژها و جریان‌های اندازه‌گیری شده  $rms$  می‌باشند. پیاده‌سازی عیوب در مدار بصورت افزایش مقادیر مقاومت-ها انجام می‌شود. به طور مثال شکل ۱۴ شکل موج ولتاژ ورودی به واحد تنظیم‌سازی فرستنده در حالت مقاومت کابل برابر ۰.۵ اهم (حالت نرمال) و مقاومت کابل برابر ۱ اهم (حالت وقوع خرابی) نشان می‌دهد.

در مدار گیرنده در شاخه‌ی بالا فیلترهای مربوط به فرکانس ۱۶۸۲ هرتز و در مدار شاخه‌ی پایین فیلترهای مربوط به فرکانس ۱۷۱۶ هرتز قرار دارند.

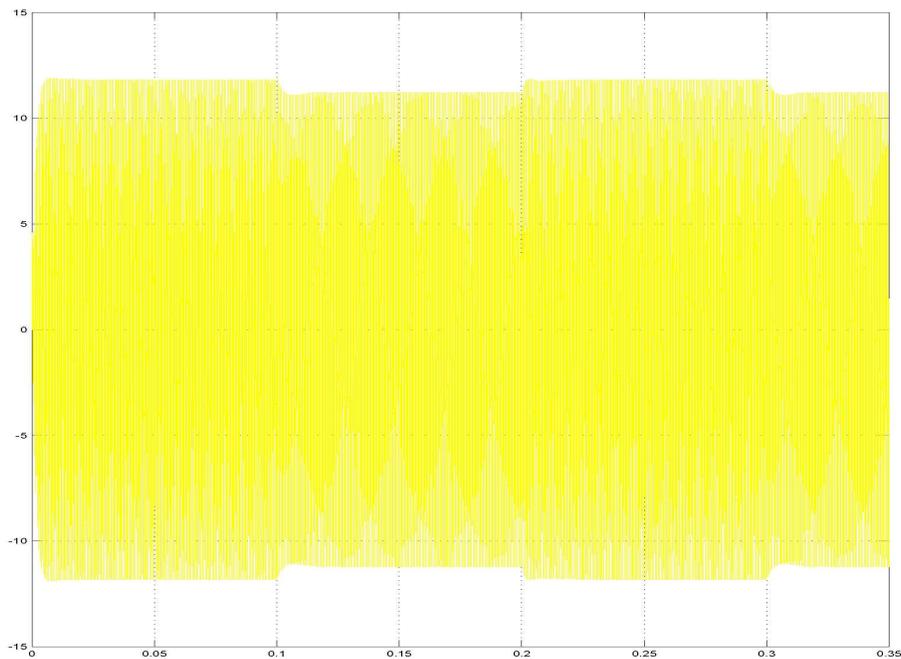
#### ۷- عیوب متداول مربوط به مدار راه‌ها و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به خطاها

یک دسته از عیوب متداول رخ داده در مدارات راه قطع‌شدگی کابل‌های مختلف موجود بین اجزا و یا افزایش مقاومت اتصال آنها می‌باشد. این خرابی‌ها عمدتاً مرتبط به هوای گرم و یا زنگ‌زدگی می‌باشند و با افزایش مقاومت اتصال نمایان می‌گردند. از این رو در این مقاله بیشتر، این عیوب مورد توجه قرار می‌گیرند. عیوب بررسی شده در این مقاله بصورت زیر می‌باشند. [۱۱]

- ۱- قطع شدن کابل بین فرستنده و واحد تنظیم‌سازی مربوط به آن
- ۲- قطع شدن کابل بین گیرنده و واحد تنظیم‌سازی مربوط به آن



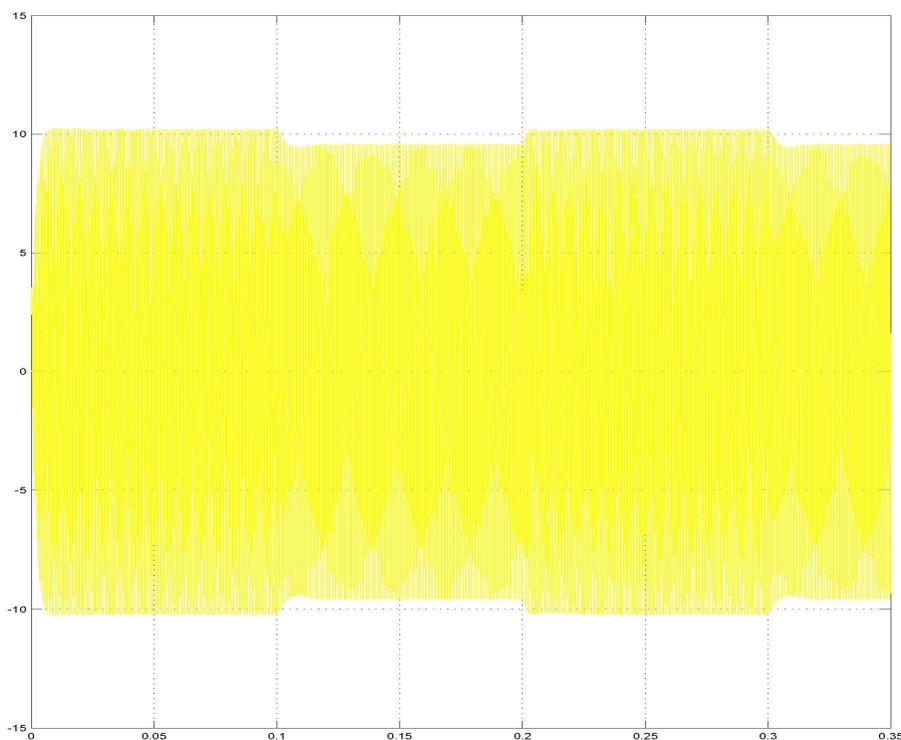
شکل ۱۳- محل قرارگیری سنسورها



شکل ۱۴- الف- ولتاژ ورودی واحد تنظیم‌سازی فرستنده به ازاء مقاومت کابل برابر ۰.۵ اهم

به منظور پایش وضعیت عناصر مدار و کنترل وضعیت آنها کدهای دیگری بمنظور اعلام حالت فرسودگی و نزدیکی خرابی نیز در نظر گرفته شده است که به صورت جدول ۲ می‌باشند. در حقیقت در این شرایط یکی از عناصر مدار در حال خارج شدن از محدوده‌ی عملکردی مجاز خود می‌باشد که این تغییر حالت‌ها بصورت کاهش جریان‌ها و یا تغییر در حساسیت گیرنده خود را نشان می‌دهند، ولی تغییرات در حال حاضر به اندازه‌ای نیستند که عملکرد مدار راه را تحت شعاع قرار دهند و آن را از سرویس خارج کنند.

مجموعاً ۶۰۰۰ داده‌ی نمونه‌برداری شده از مدار جمع‌آوری گردید. این مجموعه به ۲ قسمت تقسیم شد که از یک مجموعه برای ساخت و آموزش مدل و از مجموعه‌ی دیگر برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای ۶ حالت خرابی مورد نظر کدهایی در نظر گرفته شده که خروجی مدل ANFIS نهایی را تشکیل می‌دهند. این کدها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴-ب- ولتاژ ورودی واحد تنظیم‌سازی فرستنده به ازاء مقاومت کابل برابر ۱ اهم

جدول ۲- کدهای مربوط به وضعیت فرسودگی

مد خرابی	کد مربوط به حالت فرسودگی
افزایش مقاومت کابل بین فرستنده و واحد تنظیم سازی مربوط به آن	۲
فرسودگی واحد تنظیم‌سازی مربوط به فرستنده و یا افزایش مقاومت کابل آن	۴
فرسودگی واحد تنظیم‌سازی مربوط به گیرنده و یا افزایش مقاومت کابل آن	۶
افزایش مقاومت کابل بین گیرنده و واحد تنظیم سازی مربوط به آن	۸
افزایش مقاومت کابل بین گیرنده و رله‌ی خط موجود در اتاق رله	۱۰

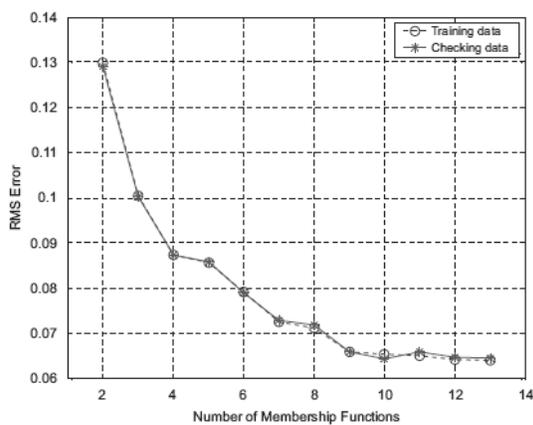
جدول ۱- کدهای مربوط به حالات مختلف وقوع عیب

مد خرابی	کد مربوط به حالت خرابی
حالت نرمال	۰
قطع شدن کابل بین فرستنده و واحد تنظیم سازی مربوط به آن	۱
خرابی واحد تنظیم‌سازی مربوط به فرستنده و یا قطعی کابل آن	۳
شکستگی ریل	۵
خرابی واحد تنظیم‌سازی مربوط به گیرنده و یا قطعی کابل آن	۷
قطع شدن کابل بین گیرنده و واحد تنظیم سازی مربوط به آن	۹
قطع شدن کابل بین گیرنده و رله‌ی خط موجود در اتاق رله	۱۱

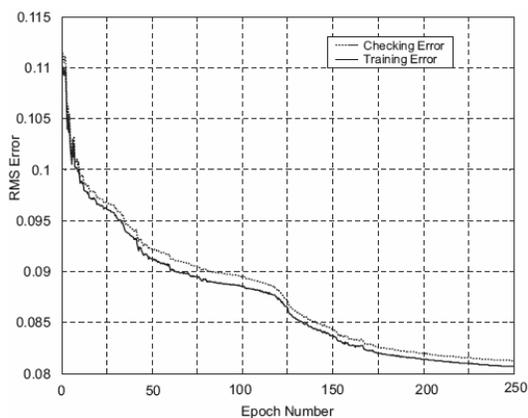
مدل جمعا ۱۲ کد را تولید خواهد نمود که هر کدام نمایانگر یک حالت (سلامت، خراب و یا در حال خراب شدن) خواهد بود. مدل فازی اولیه با بکارگیری یک مجموعه‌ی داده‌ی ۳۰۰۰ نمونه‌ای

#### ۸- تولید مدل و آموزش آن

همانگونه که قبلا اشاره شد، اندازه‌گیری‌های ۸ ولتاژ و جریان بعنوان متغیرهای ورودی مدل تشخیص عیب استفاده می‌شوند.



شکل ۱۷- خطا در برابر تعداد توابع عضویت

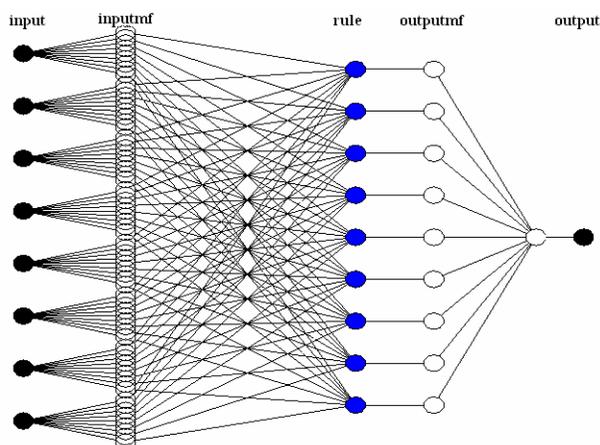


شکل ۱۸- خطا در برابر تعداد دوره‌ها

جدول ۳- نتایج تست مدل

مدت دقت مدل	مد خطا
۹۸,۶۶	۰
۹۷,۷۶	۱
۹۷,۱۲	۲
۹۹,۱۵	۳
۹۶,۲۳	۴
۹۰,۱۸	۵
۹۷,۳۲	۶
۹۸,۸۰	۷
۹۸,۷۴	۸
۹۷,۰۷	۹
۸۹,۶۸	۱۰
۹۵,۶	۱۱
۹۶,۴	میانگین

آموزش داده شد. تعداد مراکز خوشه (cluster centres) و مقادیر اولیه آنها با بکارگیری الگوریتم خوشه‌ی تفریقی (subtractive cluster algorithm) تخمین زده شد. تشخیص داده شد که rms خطای تولید شده توسط ANFIS با ۹ مرکز خوشه (و در نتیجه ۹ تابع عضویت) برای هر متغیر ورودی، به اندازه کافی کم خواهد بود (بعد از آموزش). شکل ۱۵ ساختار مدل تولید شده توسط نرم افزار MATLAB را نشان می‌دهد. مدل تولید شده دارای ۹ قانون می‌باشد.



شکل ۱۵- شبکه‌ی فازی- عصبی تولید شده توسط MATLAB

### ۹- نتایج مدل

مدل فازی با استفاده از یک مجموعه داده‌ی ۳۰۰۰ عضوی آموزش داده می‌شود. مجموعه‌ی ۳۰۰۰ عضوی دیگر برای سنجش درستی (چک کردن) در هر دوره بکار می‌رود. مدل نهایی بوسیله‌ی ۹ تابع عضویت برای هر ورودی تولید گردید. شکل ۱۶ میزان خطای RMS در برابر تعداد توابع عضویت متغیرها را نشان می‌دهد. خطاهای RMS آموزش و چک کردن در مقابل هر دوره در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطاهای RMS هم برای مجموعه‌ی داده‌ی آموزش و هم برای مجموعه‌ی داده‌ی چک کردن پس از ۲۰۰ دوره کم و بیش به حداقل می‌رسد. خروجی مدل پایش وضعیت یک بردار با مقادیر تخصیص داده شده- ی ۰ تا ۱۱ است. که ۰ نشان دهنده‌ی سلامت، ۱ نشان دهنده‌ی خرابی کامل در اثر افزایش مقاومت کابل بین فرستنده و واحد تنظیم‌سازی مربوط به آن و ۲ نشان دهنده‌ی خرابی قابل قبول ناشی از افزایش مقاومت همین کابل و ... است. مقادیر آستانه برای متمایز ساختن این سه حالت ۰,۵ و ۱,۵ می‌باشد. جدول ۳ نتایج حاصل از تست مدل را بوسیله‌ی داده‌های تست نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی با دقت بسیار خوبی خطاهای رخ داده در مدار راه را شناسایی کرده است بطوریکه خطای RMS مدل در حدود ۰,۰۹۹ درصد می‌باشد.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی گردید که با استفاده از روش‌های جدید پایش وضعیت که در آنها از الگوریتم‌ها و شبکه‌های هوشمند استفاده می‌گردد، مدلی برای پایش وضعیت یک مدار راه فرکانس صوتی ارائه گردد. بدلیل هزینه‌های بالای تهیه‌ی یک مدار راه سعی شد که برای تامین داده‌های لازم جهت تولید و آموزش شبکه از داده‌های تولید شده توسط یک مدار راه شبیه‌سازی شده استفاده گردد. از این رو با استفاده از نرم‌افزار MATLAB یک مدار راه شبیه‌سازی گردید و داده‌های آن مورد استفاده قرار گرفت. در این مدار شبیه‌سازی شده ۶ مد خطای کامل و ۵ حالت نزدیک به وقوع خرابی در نظر گرفته

شد و با تغییر مقدار مقاومت‌های مدار، این عیوب پیاده‌سازی گردید و حجم زیادی داده مربوط به حالات مختلف جمع‌آوری گردید. سپس توسط الگوریتم‌های فازی-عصبی مدل تشخیص عیب آماده گردید و آموزش داده شد. الگوریتم‌های فازی-عصبی بدلیل اقتباس مزایای شبکه‌های عصبی و منطق فازی دارای قدرت انعطاف‌پذیری بالایی بوده و زمان لازم برای آموزش آن نسبتاً کوتاه می‌باشد از این رو از این شبکه‌ها استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل ارائه شده نشان می‌دهد که شبکه‌ی آموزش دیده با دقت بالایی توانایی تشخیص و همچنین پیش‌بینی عیوب را داراست بطوریکه میانگین تشخیص صحیح حالات معیوب در حدود ۹۶,۴ درصد می‌باشد.

## ۱۱- مراجع

- 1- Dassanayake, H. P. B., Roberts, C., & Goodman, C. J. *An architecture for system-wide fault detection and isolation*. Proceedings of the IMechE Part I. Journal of Systems & Control Engineering, 215(1), 37–46. (2001)
- 2- Chen, J. and Patton, R.J. (1999). *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- 3- Gertler, J.J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. New York: Marcel Dekker.
- 4- Calado, J.M.F., Korbicz, J., Patan, K., Patton, R.J., and S.J. da Costa J.M.G. (2001). *Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems*. European Journal of Control, 7, (2–3), 248–286.
- 5- Korbicz, J. and Kowal, M. (2007). *Neuro-fuzzy networks and their application to fault detection of dynamical systems*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 20(5), 609–617.
- 6- Jang, J.-S. R. *Structure determination in fuzzy modeling: A fuzzy CART approach*, IEEE world congress on computational intelligence. (1994)
- 7- ADtranz group, *Audio Frequency Track Circuit Style TI21*, Technical Manual, 1998.
- 8- Hill, R. J., & Carpenter, D. C.. *Rail track distributed transmission line impedance and admittance: theoretical modeling and experimental results*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 42(4), 225–241. (1993)
- 9- Hill, R. J., Carpenter, D. C., & Tasar, T. *Railway track admittance, earth-leakage effects and track circuit operation*, IEEE/ ASME Joint Railroad Conference. Technical Papers, 55–62. (1989)
- 10- J. Chen, C. Roberts, P. Weston. *Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems*, Elsevier, Control Engineering Practice 16 (2008) 585–596. (2007)
- 11- P.Proctor, A. G. Hessami. *INFRASTRUCTURE RISK MODELLING, JOINTLESS TRACK CIRCUIT TI21 TYPE*, RAILTRACK EE&CS REPORT. (1997)