

## Design and Fabrication of a Nondestructive System for Detecting and Measuring Cracks in RDD-S11 Rail Defect Detector Equipment

Saeed Kahrobaee<sup>1\*</sup>, Hossein Norouzi Sahraei<sup>2</sup>, Farzad Akhlaghi Modiri<sup>2</sup>, Iman Ahadi Akhlaghi<sup>3</sup>

1- Department of Industrial and Mechanical Engineering, Sadjad University, Mashhad, Iran.

2- Sadjad Center for Nondestructive Evaluation, Sadjad University, Mashhad, Iran.

3- Department of Electrical Engineering, Sadjad University, Mashhad, Iran.

\*kahrobaee@sadjad.ac.ir

### Abstract

This study aims to design and manufacture a crack detection/measurement system for railway lines. Rolling contact fatigue cracks are among the most significant railway surface defects and most failures and rail fractures arise from this type of defect. In case of well-timed detection of these cracks, the overgrowth of them and subsequently rail fracture could be avoided by preventive grinding. In this study, the capability of two conventional non-destructive methods for crack detection, including Magnetic Flux Leakage (MFL) and Eddy Current (EC) tests, have been evaluated. The results indicate that, despite capability of detecting the position and depth of cracks, the MFL method has several limitations, such as the high weight of the yoke and high field strength, making the probe move harder over the rail. Instead, the EC probes are very light and excite the rail surface with a weak magnetic field, providing a higher scanning speed. Besides, EC probes indicate high accuracy and reliability for determination the location and depth of cracks. In RDD-S11, which is currently being used in lines one and two of Mashhad Urban Railway Company to detect three common defects, the proposed EC sensors have been used.

**Keywords:** Rail Defects, Rolling Contact Fatigue Cracks, Magnetic Flux Leakage Test, Eddy Current Test, Nondestructive Tests

## طراحی و ساخت سیستم غیرمخرب تشخیص و اندازه‌گیری ترک در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11

سعید کهربائی<sup>۱\*</sup>، حسین نوروزی صحرائی<sup>۲</sup>، فرزاد اخلاقی مدیری<sup>۲</sup>، ایمان احدی اخلاقی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران.

۲- مرکز بررسی‌های غیرمخرب سجاد، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران.

۳- دانشکده مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران.

\*kahrobaee@sadjad.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به طراحی و ساخت یک سیستم غیرمخرب جهت تشخیص و اندازه‌گیری مشخصه‌های ترک در خطوط ریلی پرداخته شده است. ترک‌های خستگی تماسی غلتشی از مهمترین عیوب سطحی خطوط ریلی هستند و بیشترین آمار خرابی‌ها و شکستگی‌های ریل ناشی از آن‌ها است. در صورتی که این ترک‌ها در خطوط ریلی به موقع شناسایی شوند، می‌توان با انجام سنگ‌زنی پیشگیرانه مانع از رشد بیش از حد آن‌ها و بروز خرابی شد. در این پژوهش، قابلیت دو روش غیرمخرب متداول در ترک‌یابی شامل نشت شار مغناطیسی و جریان گردابی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که آزمون نشت شار مغناطیسی علیرغم قابلیت تشخیص موقعیت و عمق ترک‌ها دارای محدودیت‌هایی همچون وزن بالای یوک و قدرت بالای میدان تحریک (که منجر به کاهش سرعت حرکت پروب بر روی سطح ریل می‌شود) است. در حالی که حسگرهای آزمون جریان گردابی علاوه بر اینکه سبک بوده و با اعمال میدان تحریک کوچک پروب روی سطح ریل (به صورت موضعی) خللی در حرکت پروب بر روی سطح ایجاد نمی‌شود، دارای دقت و تکرار پذیری بالایی برای تشخیص موقعیت و عمق ترک‌ها است. بنابراین روش جریان گردابی پیشنهادی در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی پیاده‌سازی شده و در شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد در حال استفاده است.

**واژگان کلیدی:** عیوب ریلی، ترک‌های خستگی تماسی غلتشی، آزمون نشت شار مغناطیسی، آزمون جریان گردابی، آزمون‌های غیرمخرب.

### ۱- مقدمه

فرم با نرخ کرنش بالا و یا ترمز قطار ایجاد می‌شود که نرخ سرمایه‌های بالایی را پس از عبور چرخ به همراه دارد. دما در این سطح کوچک ممکن است به طور ناگهانی به حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. این گرمایش موضعی همراه با جابجایی برشی شدید لایه‌های سطحی ریل، ناشی از تنش‌های عمودی و مماسی، سبب تغییرات ساختاری سطح ریل و ایجاد لایه‌های سطحی ترد در سطح تماسی ریل می‌شوند. به دنبال شکسته شدن این لایه‌ها و نیز جوانه‌زنی ترک در اثر تغییر فرم پلاستیک شدید ریزساختار، عیوبی تحت عنوان عیوب ترک‌های خستگی تماسی غلتشی ایجاد می‌شوند [۱]. در واقع، خستگی تماس غلتشی به صورت ترک‌هایی در سطح تماس ریل و چرخ، به

ترک‌های خستگی تماسی غلتشی (RCF<sup>۱</sup>) از مهمترین عیوب خطوط ریلی در مسیرهای پرتردد می‌باشند و بسیاری از خسارات جدی این خطوط از آن‌ها نشأت می‌گیرد. در سطح ریل، ترکیبی از تنش‌های فشاری و برشی بسیار شدید در اثر حرکت چرخ در یک سطح بیضوی کوچک به وجود می‌آید. این تنش‌ها به همراه تنش‌های هنگام حرکت قطار در قوس، تنش‌های ایجاد شده در اثر عدم تطابق پروفیل ریل با چرخ، تنش‌های ترمز، تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماند، حالت تنش پیچیده‌ای در سطح تماس کوچک چرخ و ریل ایجاد می‌کنند. همچنین، در سطح تماس، گرمایش موضعی در اثر لغزش، اصطکاک، تغییر

<sup>1</sup> Rolling Contact Fatigue: RCF

و با مکانیزم فتری که تماس کامل پروب و ریل را در حین حرکت تامین می‌کند، طراحی و ساخته شد. این سیستم یکی از بخش‌های دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 می‌باشد که توانایی تشخیص همزمان سه عیب کاروگیشن<sup>۵</sup>، سایش و ترک‌های ناشی از خستگی لغزشی را به صورت کیفی و کمی با دقت بالا دارد. این دستگاه در مرکز بررسی‌های غیر مخرب دانشگاه سجاد طراحی و ساخته شده است و در حال حاضر در خطوط یک و دو شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد در حال استفاده است.

## ۲- طراحی و ساخت

دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در این دستگاه برای تشخیص و اندازه‌گیری ترک‌های خستگی غلتشی از یک سیستم غیرمخرب استفاده شده است که به کمک آن و در کنار سیستم اندازه‌گیری مسافت (انکودر) تشخیص ترک‌ها و موقعیت دقیق آن‌ها در طول مسیر حرکت دستگاه ممکن خواهد بود. به منظور طراحی و ساخت سیستم غیرمخرب تشخیص و اندازه‌گیری ترک‌ها در این پژوهش دو روش نشت شار مغناطیسی (MFL) و جریان گردابی (EC) مورد بررسی قرار گرفتند.

### ۲-۱- طراحی و ساخت سیستم نشت شار مغناطیسی

پس از مطالعه و بررسی روش‌های مختلف غیرمخرب، ابتدا از روش نشت شار مغناطیسی برای شناسایی ترک‌های RCF استفاده شد. مبانی این روش به طور خلاصه به این صورت است که با اعمال یک میدان مغناطیسی قوی به ریل، شار مغناطیسی از محل ناپیوستگی‌ها (مانند ترک‌های سطحی و زیرسطحی)، دچار نشتی می‌شود. در صورت تشخیص این شار نشتی توسط سنسورهایی که در مجاورت سطح ریل قرار می‌گیرند، امکان تشخیص موقعیت و عمق ترک فراهم می‌شود.

ویژه در قوس‌ها و به دلیل بارگذاری تناوبی و بروز زود هنگام آثار خستگی در ماده رخ می‌دهد. با ادامه بارگذاری، این ترک‌ها رشد کرده و منجر به شکست ریل خواهند شد. در حال حاضر، عیوب ناشی از خستگی تماس غلتشی، بیشترین آمار خرابی‌ها و شکستگی‌های ریل را به خود اختصاص می‌دهند [۲].

تشخیص به موقع این صدمات ریلی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در صورت عدم شناسایی به موقع این ناپیوستگی‌ها و تعمیر آنها، میزان عیوب از مقادیر بحرانی تجاوز کرده و منجر به خسارات جبران ناپذیری می‌شود. بازرسی چشمی قدیمی‌ترین روش برای تشخیص این ترک‌ها است. این روش، ساده اما وقت‌گیر و غیر قابل اعتماد است و در مواردی به نتایج اشتباه منجر می‌شود [۳]. در حال حاضر، پرکاربردترین روش‌های شناسایی ترک‌های خستگی غلتشی آزمون‌های فراصوتی<sup>۲</sup> [۴-۶]، نشت شار مغناطیسی<sup>۳</sup> [۷ و ۸] و جریان گردابی<sup>۴</sup> [۹-۱۲] هستند. آزمون فراصوتی روشی سریع و قابل اعتماد بوده اما تفسیر نتایج آن دارای دشواری‌هایی می‌باشد. همچنین، این روش در شناسایی ترک‌های کناره ریل کارایی ندارد [۴]. آزمون غیرمخرب و کارآمد نشت شار مغناطیسی نیز در ترک‌یابی قطعات صنعتی و خطوط ریلی کاربرد دارد. به کمک این روش می‌توان می‌توان اطلاعاتی از وقوع ترک و عمق آن به دست آورد [۷]. همچنین، آزمون جریان گردابی یک روش مشخصه‌یابی غیرمخرب است که علاوه بر شناسایی ریزساختار و خواص فیزیکی/مکانیکی مواد، کاربردهایی همچون شناسایی ترک‌های سطحی و زیرسطحی نیز دارد. از مزایای آزمون جریان گردابی در بازرسی ریل می‌توان به شناسایی زود هنگام ترک‌ها در سطح و زیرسطح، تحلیل سریع و آسان نتایج، امکان ادغام سیستم بازرسی جریان گردابی با ماشین‌های ارزیاب خطوط ریلی و ... اشاره کرد [۹].

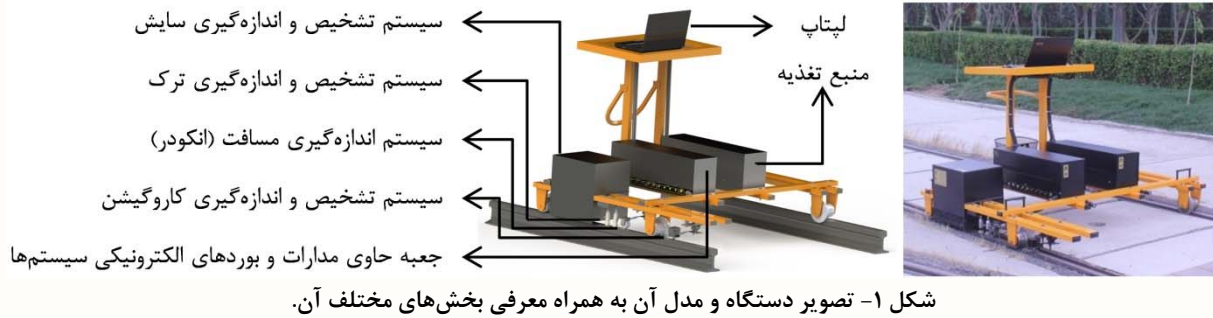
در این پژوهش برای اولین بار در کشور، سیستمی غیرمخرب جهت تشخیص و اندازه‌گیری ترک در خطوط ریلی مبتنی بر استفاده از پروب‌های جریان گردابی تفاضلی

<sup>4</sup> Eddy current

<sup>5</sup> Corrugation

<sup>2</sup> Ultrasonic

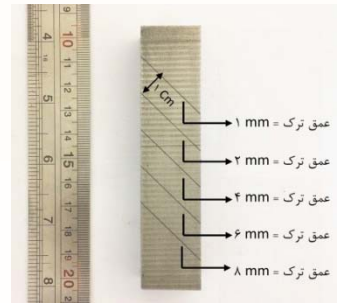
<sup>3</sup> Magnetic Flux Leakage (MFL)



شکل ۱- تصویر دستگاه و مدل آن به همراه معرفی بخش‌های مختلف آن.

سیگنال‌ها پس از عبور از کارت آنالوگ به دیجیتال توسط نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شوند. بیشینه ولتاژ خروجی در سنسور اثر هال که با نشت شار مغناطیسی ارتباط مستقیم دارد، به عنوان خروجی اصلی این آزمون در نظر گرفته شده و تغییرات آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

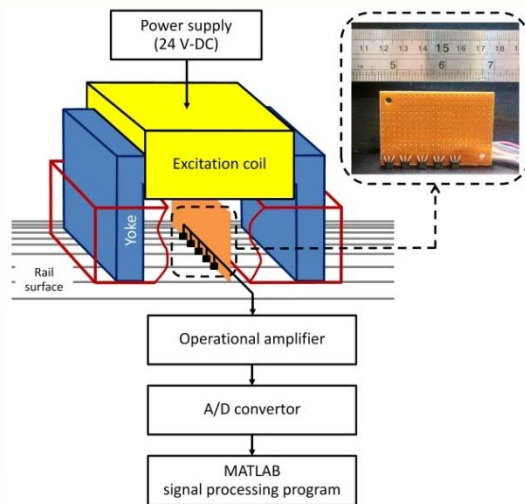
پس از اطمینان از عملکرد روش MFL در ترک‌یابی، به منظور روبش سطح ریل، بهینه‌سازی و کالیبراسیون آزمون MFL نیاز به طراحی سیستمی شامل پروب‌های تحریک، سنسورهای اثر هال و مدارهای تقویت کننده می‌باشد. در این سیستم به منظور تحریک ریل نیاز به استفاده از پروب‌هایی است که تمام سطح ریل را پوشش دهند. پس از بررسی‌های جامع انجام شده، برای تحریک سطح ریل تعداد ۲ پروب که اولی به منظور تحریک سطح ریل (با موقعیت عمود به ریل) و دومی به منظور تحریک قسمت لبه ریل (قرارگیری با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ریل) می‌باشد، طراحی و ساخته شد. هسته هر دو پروب به شکل یوک از ورق‌های ترانس (از جنس فولاد M5 با نفوذپذیری بسیار بالا) ساخته شده و بر اساس محاسبات انجام شده، ۱۰ هزار دور سیم مسی با سطح مقطع ۰/۲۵ میلی‌متر مربع به دور آن پیچیده شد. شماتیک دو پروب شامل مجموعه یوک‌های مغناطیسی، سنسورهای هال، فیکسچرهای نگهدارنده سنسورها در داخل یوک و قاب نگهدارنده مجموعه بر روی ترولی در شکل ۳-الف نشان داده شده است. موقعیت قرارگیری این دو پروب عمودی و زاویه دار (۴۵ درجه) نسبت به ریل و ترولی نیز در شکل ۳-ب مشهود است. همچنین اجزای مختلف یکی از پروب‌های MFL در شکل ۳-ج مشاهده می‌شود.



شکل ۲- تصویر نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی.

در طراحی این سیستم اندازه‌گیری، در ابتدا به منظور بررسی امکان‌پذیری این روش و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر، آزمایش‌هایی بر روی نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی با ترکیب شیمیایی نزدیک به ریل‌های موجود انجام شد که در ادامه به آن پرداخته شده است. تصویر نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی در شکل ۲ قابل مشاهده است. ابتدا و با استفاده از یک چیدمان آزمایشگاهی، سطح این نمونه به کمک روش نشت شار مغناطیسی روبش گردید. در این سیستم ابتدا شکل موج مثلی با فرکانس ۰/۱ Hz ایجاد و از طریق کارت تبدیل دیجیتال به آنالوگ و پس از تقویت به دامنه ولتاژ ۱۰V- +۱۰V/ و جریان ۱ آمپر رسیده و به دو سر سیم‌پیچ‌های تحریک<sup>۱</sup> (با تعداد هر کدام ۱۵۰۰ دور سیم مسی با قطر ۰/۴۵ میلی‌متر) اعمال می‌شود. در اثر عبور جریان از سیم‌پیچ تحریک، شار مغناطیسی تولید و در یوک مغناطیسی و همچنین قطعه مورد آزمایش انتشار می‌یابد. سپس نشت شار رخ داده توسط چند سنسور اثر هال که در نزدیکی سطح نمونه قرار گرفته‌اند، شناسایی می‌شود. سنسور اثر هال یک حسگر میدان مغناطیسی است که در اثر عبور شار مغناطیسی از آن، چگالی شار مغناطیسی را به سیگنال الکتریکی متناظر با آن تبدیل می‌کند. این

<sup>1</sup> Driving or excitation coil



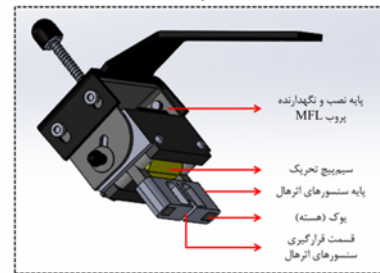
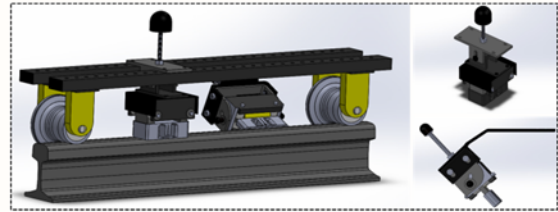
شکل ۴- طرح شماتیک سیستم غیرمخرب MFL طراحی شده به منظور ترک‌یابی سطح ریل.



شکل ۵- تصویر ریل S49 دارای ترک مصنوعی.

۲-۲- طراحی و ساخت سیستم جریان گردابی  
شکل ۶، شماتیک سیستم جریان گردابی مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این سیستم، ابتدا، یک شکل موج سینوسی با دامنه ۳-/+۳ ولت و در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز توسط کارت D/A تولید و پس از تقویت جریان به دو سر سیم‌پیچ تحریک<sup>۲</sup> دو پروب سیستم اعمال می‌گردد. در اثر عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ تحریک و تغییر شار مغناطیسی در ریل، جریان‌های گردابی ایجاد می‌شوند. جهت این جریان‌ها به گونه‌ای است که میدان مغناطیسی ناشی از آنها در خلاف جهت میدان مغناطیسی اولیه بوده و با آن مقابله می‌کنند. برآیند میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه توسط سیم‌پیچ‌های حسگر<sup>۳</sup> پروب‌ها که در نزدیکی سطح نمونه قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود. ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های حسگر دو پروب، به منظور استخراج جذر میانگین مربعات (RMS<sup>۴</sup>) ولتاژ القایی در سیم پیچ

<sup>4</sup> Root Mean Square



شکل ۳- الف) مدل رایانه‌ای دو پروب MFL عمودی و زاویه‌دار، ب) موقعیت قرارگیری پروب‌های MFL نسبت به ریل و ج) اجزا مختلف یکی از پروب‌های سیستم MFL.

شکل ۴ طرح شماتیک سیستم طراحی شده و آرایه سنسورهای اثرهال تشخیص ترک‌های سطح ریل را نشان می‌دهد. در این سیستم ابتدا توسط یوک و کوئل‌های طراحی شده، قطعی از ریل که با یوک پوشش داده می‌شود، تحت تحریک مغناطیسی قرار گرفت. سپس در صورت وجود RCF، تغییرات شار ناشی توسط سنسورهای اثرهال آنالوگ شناسایی می‌شود. پس از تقویت سیگنال خروجی سنسورهای اثرهال و گذر آن از کارت آنالوگ به دیجیتال، پردازش آن‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. در نهایت، بر اساس شدت پیک‌های خروجی، موقعیت و عمق ترک‌ها تعیین می‌شوند. به منظور بررسی عملکرد این سیستم و بهینه سازی آن، ترک‌هایی مصنوعی بر روی یک قطعه از ریل S49 با عمق‌های مختلف (۱، ۲، ۳ و ۴ میلیمتر) با استفاده از روش وایرکات ایجاد و سطح این ریل با این روش روبش شد. تصویر این ریل و ترک‌های مصنوعی آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

<sup>2</sup> Driving coil

<sup>3</sup> Pickup coil



منحنی تغییرات بیشینه ولتاژ خروجی بر حسب موقعیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشینه ولتاژ هر سنسور در موقعیت نزدیک به ترک‌ها دچار افت شده است. این افت در میزان بیشینه ولتاژ هر سنسور، با افزایش عمق ترک بیشتر می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در اثر روبش سطح با این روش امکان تشخیص محل و عمق ترک‌ها وجود دارد.

با توجه به این که با استفاده از جریان مستقیم برای تحریک در سیستم نهایی امکان چسبندگی پروب به سطح ریل وجود دارد، روبش سطح نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی با ایجاد یک فاصله هوایی (یک میلیمتر) میان پایه‌های یوک و نمونه تکرار شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۹ قابل مشاهده است. منحنی تغییرات بیشینه ولتاژ خروجی بر حسب مکان در حالت وجود فاصله هوایی نیز برای این نمونه نشان می‌دهد که در موقعیت‌های نزدیک به ترک‌ها، خروجی سنسورها دچار افت شده است. در واقع یک پیک در منحنی ظاهر شده است که شدت آن تحت تاثیر عمق ترک می‌باشد. برای ترک‌های با عمق کم، این پیک به صورت واضح دیده نمی‌شود. البته، در صورت استفاده از جریان تحریک قوی‌تر این مشکل رفع خواهد شد.

پس از تایید عملکرد آزمون نشت شار مغناطیسی در ترک‌یابی، به منظور روبش سطح ریل با ترک‌های مصنوعی پروب‌هایی آماده و بر روی ترولی نصب شد که تصویر آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود. پس از انجام چند مرحله آزمون بر روی خطوط ریلی شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد، موارد ذیل به عنوان محدودیت‌های این روش شناسایی شدند:

الف) به دلیل استفاده از هسته‌های مغناطیسی سنگین سیم‌پیچ تحریک، پروب‌ها وزن بسیار زیادی دارند.

ب) به دلیل وزن بالای مجموعه یوک و سنسورها، امکان ثابت نگه داشتن یوک‌ها و سطح ریل با مکانیزم اتصال به فنر امکان‌پذیر نیست. این مسئله چالش مهمی بوده و رفع آن در عمل ممکن نشد. در نتیجه این مشکل، حین حرکت دستگاه در اثر کوچکترین تغییر در فاصله یوک‌ها و سطح ریل، خروجی‌های این آزمون تحت تاثیر این تغییرات فاصله قرار می‌گیرد؛ به گونه‌ای که با تغییرات خروجی ناشی از وجود ترک ممکن است اشتباه گرفته شود.

حسگر، از یک مدار آشکارساز پوش<sup>۵</sup> عبور خواهند کرد. آشکارساز پوش شامل دو بخش یکسوساز و فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع مناسب است. پس از انجام عمل آشکارسازی پوش و تقویت، از یک تقویت‌کننده تفاضلی استفاده می‌شود. سیگنال پوش حاصل از طریق کارت A/D دریافت و توسط نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شود. آشکارساز پوش شامل دو بخش یکسوساز و فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع مناسب است. پس از انجام عمل آشکارسازی پوش و تقویت، سیگنال پوش از طریق کارت A/D دریافت و توسط نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شود. بررسی عملکرد سیستم جریان‌گردابی و تعیین بهینه فرکانس و تعداد دور سیم‌پیچ‌های حسگر و تحریک جهت تشخیص ترک، بر روی قسمتی از سطح ریل دارای ۴ ترک مصنوعی به عمق‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر به فاصله ۱ سانتی‌متر انجام شد. جزئیات آزمون‌های انجام شده توسط این سیستم به منظور بررسی عملکرد و بهینه‌سازی آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

در نهایت و با توجه به نتایج حاصل شده در آزمون‌های اولیه، پروب‌هایی صنعتی با بدنه آلومینیومی به منظور نصب بر روی ترولی و روبش سطح ریل ساخته شد. با توجه به اینکه قطعه مورد بازرسی (ریل) یک ماده فرومغناطیس است و حضور ترک بر روی آن منجر به ایجاد تغییرات شدیدی در خروجی آزمون می‌شود، می‌توان از تاثیر ناچیز بدنه آلومینیومی که یک ماده پارامغناطیس می‌باشد بر نتایج آزمون، صرف نظر نمود. در این دستگاه از دو پروب مختلف به صورت تفاضلی استفاده شده است و خروجی این دو پروب از یکدیگر کم شده و تغییرات مقدار حاصل به عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۷ مدل رایانه‌ای سیستم تشخیص و اندازه‌گیری ترک و موقعیت قرارگیری دو پروب بر روی ترولی و نسبت به ریل واقعی مشاهده می‌شود. برخی مشخصات مهم پروب‌های سیستم جریان‌گردابی در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

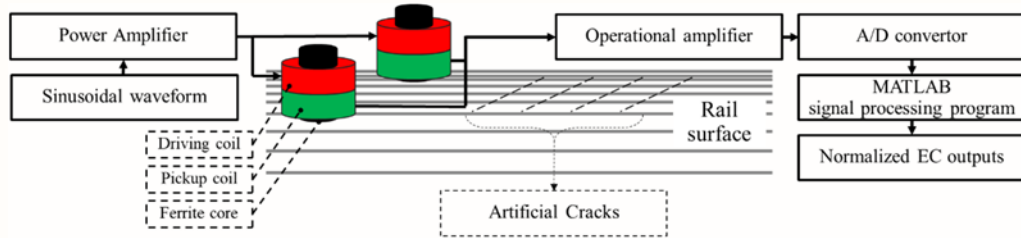
#### ۳-۱- نتایج حاصل از سیستم نشت شار مغناطیسی

شکل ۸ تصویر شماتیک سطح نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی و موقعیت‌های انجام آزمون MFL را به همراه

<sup>5</sup> Envelope detector

به دلیل وجود این محدودیت‌ها، بررسی‌های بیشتر روش نشت شار مغناطیسی متوقف و روش آزمون جریان گردابی بررسی شد.

(ج) برای تغذیه این مجموعه باید از دو باتری خودرو استفاده می‌شد که این نیز سبب افزایش مجدد وزن ترولی می‌گردد.



شکل ۶- تصویر شماتیک سیستم غیرمخرب جریان گردابی طراحی شده به منظور ترک‌یابی سطح ریل.

جدول ۲- برخی مشخصات مهم پروب‌های سیستم جریان گردابی

| مشخصات سیم‌پیچ‌های حسگر و تحریک* |                         |             |             |
|----------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|
| تعداد دور سیم‌پیچ حسگر           | تعداد دور سیم‌پیچ تحریک | ۲۵۰         | ۲۰۰         |
| قطر داخلی سیم‌پیچ حسگر           | قطر داخلی سیم‌پیچ تحریک | ۸ میلی‌متر  | ۸ میلی‌متر  |
| قطر خارجی سیم‌پیچ حسگر           | قطر خارجی سیم‌پیچ تحریک | ۲۲ میلی‌متر | ۲۲ میلی‌متر |
| ارتفاع سیم‌پیچ حسگر              | ارتفاع سیم‌پیچ تحریک    | ۱۰ میلی‌متر | ۱۰ میلی‌متر |
| مشخصات هسته فریتی                |                         |             |             |
| قطر                              | ارتفاع                  | ۲۰ میلی‌متر | ۸ میلی‌متر  |
| فاصله پروب‌ها از یکدیگر          |                         |             |             |
| فاصله عرضی مرکز پروب‌ها          | فاصله طولی مرکز پروب‌ها | ۳ سانتیمتر  | ۵ سانتیمتر  |

\* در پروب‌های ساخته شده، سیم‌پیچ تحریک و حسگر بدون فاصله از یکدیگر کاملاً بر روی هم قرار دارند. سیم‌پیچ تحریک در بالا و سیم‌پیچ حسگر در پایین و نزدیک‌تر به سطح ریل قرار گرفته است.

جدول ۱- آزمون‌های انجام شده برای تعیین فرکانس بهینه و تعداد دور سیم‌پیچ‌های تحریک و حسگر

| تعداد دور حسگر | تعداد دور تحریک | فرکانس (KHz)          | ردیف | تعیین فرکانس بهینه |
|----------------|-----------------|-----------------------|------|--------------------|
| ۲۵۰            | ۲۵۰             | ۱                     | ۱    |                    |
|                |                 | ۵                     | ۲    |                    |
|                |                 | ۱۰                    | ۳    |                    |
|                |                 | ۲۰                    | ۴    |                    |
|                |                 | ۵۰                    | ۵    |                    |
| ۱۰۰            | ۶               | تعیین تعداد دور بهینه |      |                    |
| ۲۵۰            | ۱۰۰             |                       | ۷    |                    |
| ۵۰۰            | ۱۰۰             |                       | ۸    |                    |
| ۲۵۰            | ۲۰۰             |                       | ۹    |                    |
| ۵۰۰            | ۲۰۰             |                       | ۱۰   |                    |
| ۲۵۰            | ۳۰۰             |                       | ۱۱   |                    |
| ۵۰۰            | ۳۰۰             | ۱۲                    |      |                    |

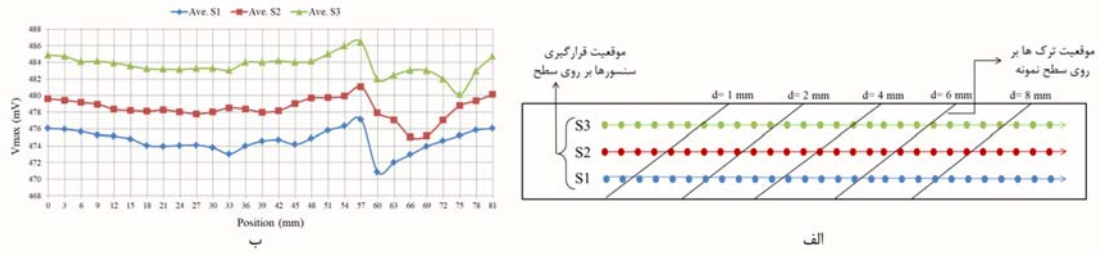


ب



الف

شکل ۷- سیستم طراحی شده تشخیص و اندازه‌گیری ترک نصب شده بر روی ترولی، (الف) مدل رایانه‌ای و (ب) تصویر واقعی.



شکل ۸- الف) تصویر شماتیک سطح نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی و موقعیت‌های انجام آزمون و ب) منحنی تغییرات بیشینه ولتاژ خروجی بر حسب مکان برای سه سنسور اثر هال مورد استفاده در آزمون نشت شار مغناطیسی.



شکل ۹- الف) تصویر شماتیک سطح نمونه فولادی دارای ترک مصنوعی و موقعیت‌های انجام آزمون و ب) منحنی تغییرات بیشینه ولتاژ خروجی بر حسب مکان برای سه سنسور اثر هال مورد استفاده در آزمون نشت شار مغناطیسی با فاصله هوایی میان پایه‌های کوئل و نمونه.

قرار گرفته در زیر پروب را هوا تشکیل داده و خروجی آزمون با شدت بیشتری افت پیدا می‌کند. نتایج این آزمون نشان می‌دهند با این که در تمام فرکانس‌ها ترک‌ها به خوبی تشخیص داده می‌شوند و شدت پیک ایجاد شده بر روی منحنی با عمق ترک متناسب است، در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، تغییرات دامنه ایجاد شده بیشتر از سایر فرکانس‌ها می‌باشد و خروجی آزمون تمایز بیشتری میان ترک‌های با عمق متفاوت ایجاد می‌کند. بنابراین فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به عنوان فرکانس بهینه در نظر گرفته شد.

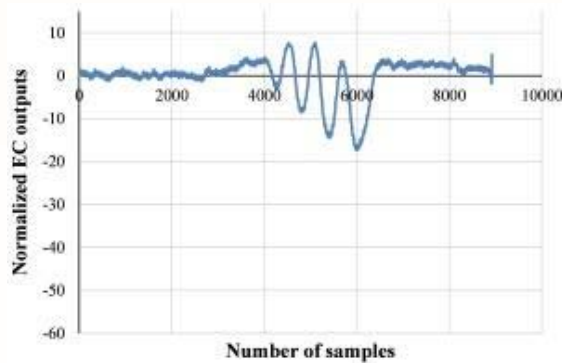
شکل ۱۱ نتایج حاصل از روبش سطح ریل توسط سیستم طراحی و ساخته شده را در فرکانس بهینه ۲۰ کیلوهرتز و با پروب‌های با تعداد دور سیم‌پیچ تحریک و حسگر متفاوت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در روبش سطح توسط پروبی با سیم‌پیچ تحریک ۱۰۰ دور، پیک مشخص و واضحی در منحنی تغییرات خروجی آزمون که ناشی از حضور ترک در سطح ریل باشد، ایجاد نشد (شکل‌های (۱۱-الف و ب)). این بدان معنی است که توسط سیم‌پیچ ۱۰۰ دور، تحریک به اندازه کافی صورت نگرفته است. اما در منحنی تغییرات حاصل از روبش سطح با سیم‌پیچ تحریک ۲۰۰ (شکل‌های (۱۱-ج و د)) و ۳۰۰ دور (شکل‌های (۱۱-ه و و)) پیک‌هایی که ناشی از افت خروجی آزمون در اثر

۲-۳- نتایج حاصل از سیستم جریان گردابی پس از روبش سطح ریل با ترک‌های مصنوعی توسط سیستم طراحی شده در فرکانس‌های مختلف، خروجی این آزمون به صورت نرماله (بهنجار) شده بر حسب تعداد نمونه برداشت شده در حین آزمون رسم شده است که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. خروجی آزمون بر ناحیه سالم و بدون ترک تقسیم شده است. این امر باعث می‌شود نتایج در فرکانس‌های مختلف باهم قابل مقایسه باشد. محور افقی نمودارهای شکل ۱۰ معیاری از زمان می‌باشد. با توجه به این که در آزمون‌های اولیه، پروب با دست حرکت می‌کند، زمان انجام آزمون برای فرکانس‌های مختلف یکسان نیست. طی روبش سطح ریل، در منحنی تغییرات خروجی آزمون در شکل ۱۰ در تمام فرکانس‌ها پس از رسیدن پروب به اولین ترک یک افت ناگهانی در خروجی مشاهده می‌شود. در اثر ترک، نفوذپذیری مغناطیسی آن قسمت از ریل به سمت نفوذپذیری مغناطیسی هوا میل می‌کند. بنابراین، برآیند میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه حس شده توسط سیم‌پیچ حسگر در منطقه دارای ترک به شدت کاهش یابد. این امر، یعنی کاهش خروجی آزمون با قرارگیری پروب در مجاورت ترک در تمامی فرکانس‌ها مشهود است. همچنین، هر چه عمق ترک افزایش یابد، حجم بیشتری از ناحیه

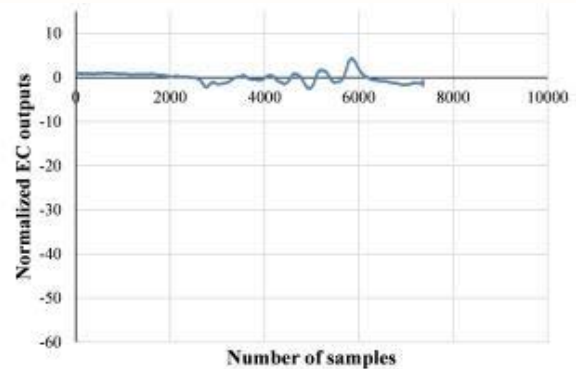


ترک‌ها ایجاد نموده است. بنابراین، در پروب‌های صنعتی جریان گردابی به منظور ترک‌یابی سطح ریل، از سیم‌پیچ تحریک ۲۰۰ دور و سیم‌پیچ حسگر ۲۵۰ دور استفاده شد. در پژوهش سانگ<sup>۱</sup> و همکاران نیز از پروبی با همین تعداد دور برای سیم‌پیچ تحریک و حسگر به جهت ترک‌یابی در خطوط ریلی استفاده شده است [۹].

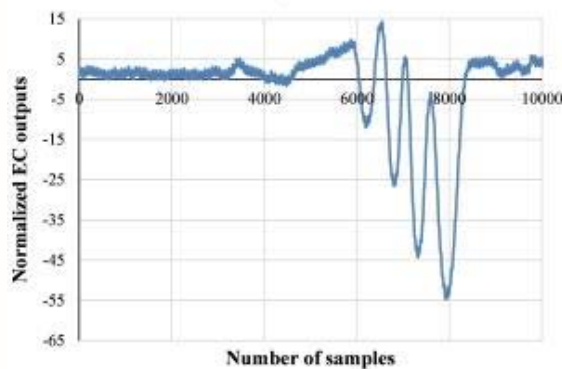
عبور پروب از روی ترک‌ها می‌باشد، مشاهده می‌شود. اما از میان این دو، تغییرات دامنه پیک‌های حاصل برای ترک‌های مختلف برای سیم‌پیچ تحریک با تعداد دور ۲۰۰ نسبت به تعداد دور ۳۰۰ بیشتر می‌باشد. در نتیجه، تعداد دور بهینه برای سیم‌پیچ تحریک ۲۰۰ دور انتخاب شد. همچنین در شکل‌های (۱۱-ج و د) مشاهده می‌شود که با استفاده از سیم‌پیچ تحریک ۲۰۰ دور، نتایج حاصل از استفاده از سیم‌پیچ حسگر ۲۵۰ دور تفکیک‌پذیری بیشتری را برای



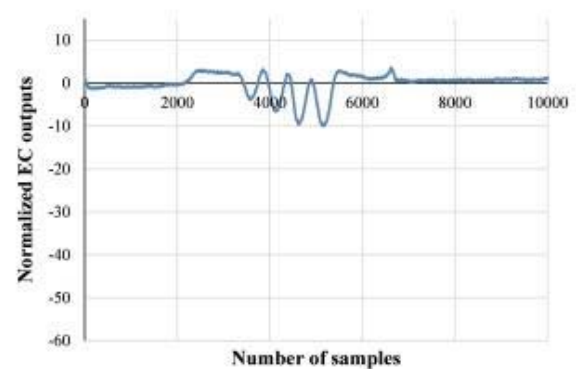
ب



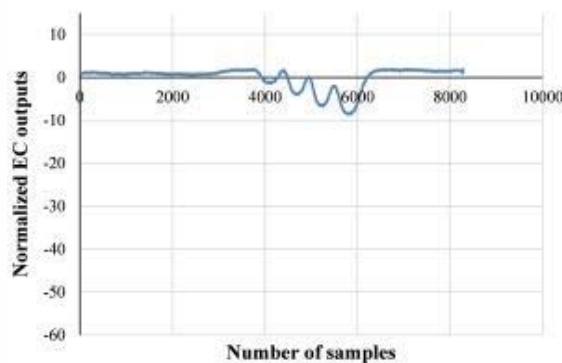
الف



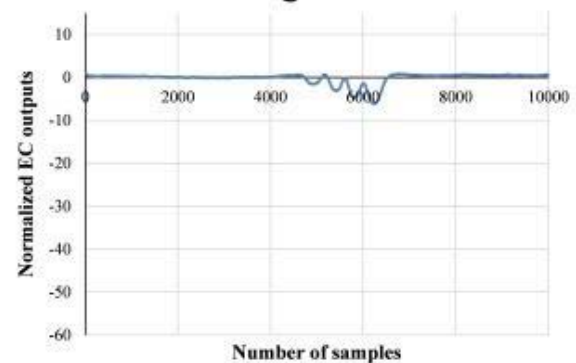
د



ج



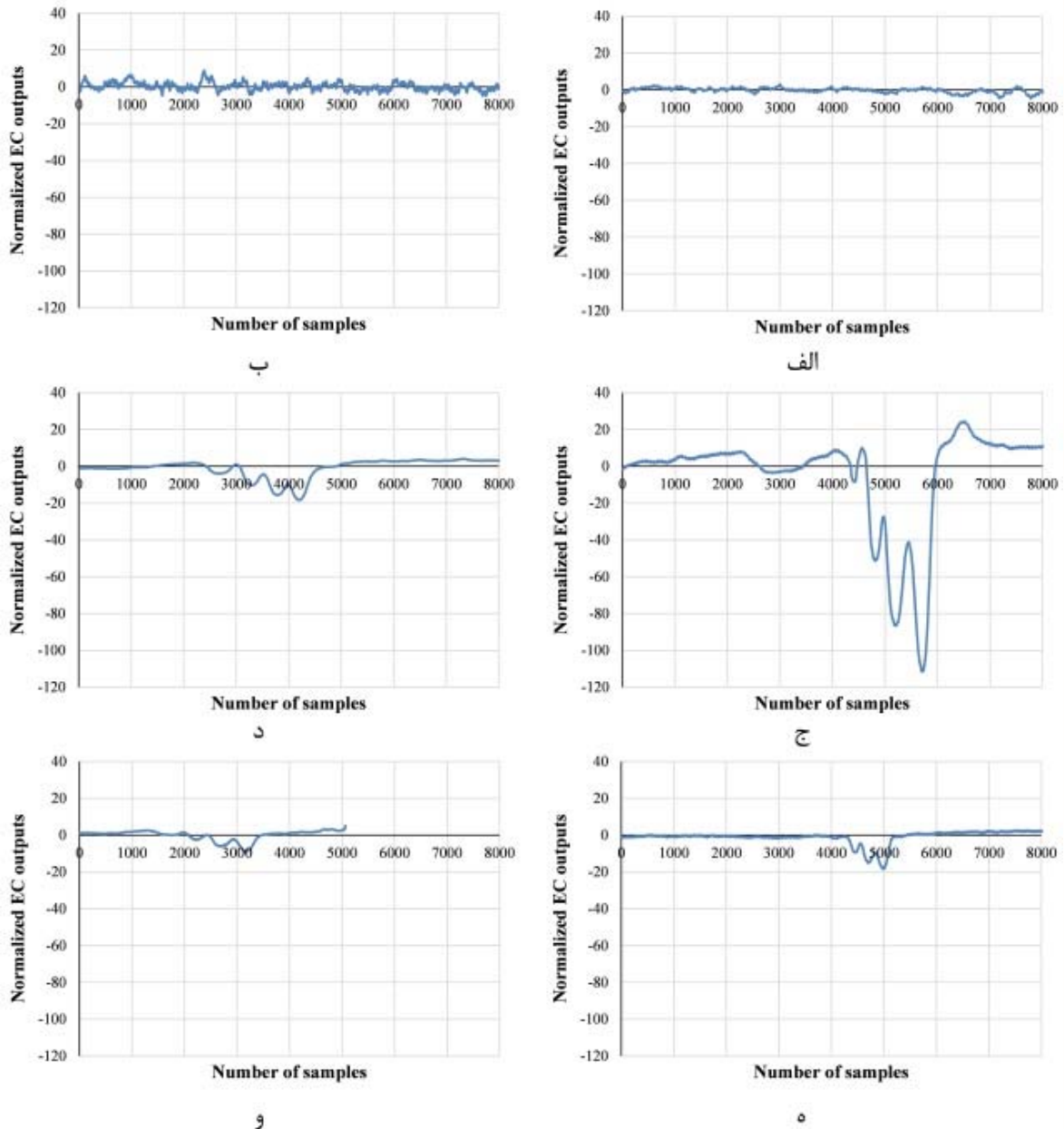
و



ه

شکل ۱۰- خروجی نرماله شده آزمون جریان گردابی بر حسب تعداد نمونه برداشته شده حاصل از روبش سطح ریل دارای ترک مصنوعی در فرکانس (الف) ۱ kHz، (ب) ۵ kHz، (ج) ۱۰ kHz، (د) ۲۰ kHz، (ه) ۵۰ kHz و (و) ۱۰۰ kHz.

<sup>1</sup> Song



شکل ۱۱- خروجی نرماله شده آزمون جریان گردابی شده بر حسب تعداد نمونه برداشت شده حاصل از روبش ریل دارای ترک مصنوعی در فرکانس ۲۰ kHz با تعداد دور سیم‌پیچ تحریک و حسگر مختلف به ترتیب الف) ۱۰۰ و ۲۵۰ دور، ب) ۱۰۰ و ۵۰۰ دور، ج) ۲۰۰ و ۲۵۰ دور، د) ۲۰۰ و ۵۰۰ دور، ه) ۳۰۰ و ۲۵۰ دور و و) ۳۰۰ و ۵۰۰ دور.

فاصله یوک‌ها و سطح ریل در طول مسیر روبش و ... عملکرد مناسبی در آزمون‌های عملیاتی و روبش سطح ریل نداشت. (ج) روش جریان گردابی محدودیت‌های عملکردی روش نشت شار مغناطیسی را در روبش سطح ریل ندارد. علاوه بر این، توانایی، دقت و تکرار پذیری این روش در شناسایی موقعیت و عمق ترک‌ها قابل قبول می‌باشد. (د) روش آزمون جریان گردابی پیشنهادی در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 پیاده‌سازی شده و در

#### ۴- جمع‌بندی

پژوهش حاضر با هدف طراحی و ساخت روش غیرمخرب تشخیص و اندازه‌گیری ترک‌های خطوط ریلی انجام و نتایج ذیل حاصل شدند.

الف) هر دو روش نشت شار مغناطیسی و جریان گردابی توانایی تشخیص موقعیت و عمق ترک را به خوبی دارند.

ب) روش نشت شار مغناطیسی با توجه به محدودیت‌هایی همچون وزن بالای سیستم، عدم امکان ثابت نگه داشتن

*Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232 (1), pp. 121-129, 2018.

شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد در حال استفاده است.

#### ۵- قدردانی و تشکر

بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از جناب آقای مهندس حسنی، جناب آقای مهندس خسروی و سایر پرسنل محترم شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد در واحد خط و ابنیه به پاس زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزشمندشان در مسیر انجام این پروژه ابراز می‌داریم.

#### ۶- منابع

- [1] J. W. Ringsberg, Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation. *International Journal of fatigue*, 23 (7), pp. 575-586, 2001.
- [2] S. Mohammadzadeh, H. Keshavarzian, H. Paydar, Investigation of effective factors in the propagation of cracks caused by rolling contact fatigue in the rail and prevention strategies to increase the service life of the rail. in: *The 5th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering*, Tehran, Iran, 2017. (in Persian)
- [3] Z. Popović, V. Radović, L. Lazarević, V. Vukadinović, and G. Tepić, 2013. Rail inspection of RCF defects. *Metalurgija*, 52 (4), pp. 537-540, 2013.
- [4] Y. Jiang, H. Wang, G. Tian, S. Chen, J. Zhao, Q. Liu, and P. Hu, Non-contact ultrasonic detection of rail surface defects in different depths. in: *IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, pp. 46-49, Xiamen, China, 2018.
- [5] R. S. Edwards, C. Holmes, Y. Fan, M. Papaalias, S. Dixon, C. L. Davis, B. W. Drinkwater, and C. Roberts, Ultrasonic detection of surface-breaking railhead defects. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50 (7), pp. 369-373, 2008.
- [6] J. J. Marais, and K. C. Mistry, Rail integrity management by means of ultrasonic testing. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26 (10), pp. 931-938, 2003.
- [7] A. G. Antipov, and A. A. Markov, Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50 (8), pp. 481-490, 2014.
- [8] J.W. Kim, J. Park, B. J. Yu, and S. Park, MFL sensing based NDE technique for defect detection of railway track. in: *8th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 2220 – 2227, Bilbao, Spain, 2016.
- [9] Z. Song, T. Yamada, H. Shitara, and Y. Takemura, Detection of damage and crack in railhead by using eddy current testing. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3, 546-550, 2011.
- [10] H. M. Thomas, A. Dey, and R. Heyder, Eddy current test method for early detection of rolling contact fatigue (RCF) in rails. *Insight*, 52 (7), pp. 361-365, 2010.
- [11] Z. Popović, L. Brajović, L. Lazarević, and L. Milosavljević, Rail defects head checking on the Serbian railways. *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, 21 (1), pp. 147-153, 2014.
- [12] J. Rajamäki, M. Vippola, A. Nurmikolu, and T. Viitala, Limitations of eddy current inspection in railway rail evaluation. *Proceedings of the Institution of*