

Nondestructive Determination of Side and Vertical Wear on the Surfaces of Railways

Iman Ahadi Akhlaghi^{1*}, Hossein Norouzi Sahraei², Farzad Akhlaghi Modiri², Saeed Kahrobaee³

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

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

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

*i_a_akhlaghi@sadjad.ac.ir

Abstract

In this paper, a nondestructive system was designed and fabricated to detect wear and to measure its parameters on railway tracks. Delayed detection of wear on railway lines can cause critical problems and makes the repair and maintenance process more time and cost-consuming. If the extent of wear exceeds the critical value, it changes the geometry of the line causing the derailment of the train. In the proposed method of wear detection, a system with a line laser and a camera is utilized. The laser lights the surface of the rail, and the camera captures an image from it. By processing the shape of the lit pattern, which is different in worn and unworn areas, we can detect wear and estimate its parameters. In the proposed method, after applying some preprocessing techniques to extract the shape of the lit pattern, an artificial neural network (ANN) is used to quantify W1, W2, and W3 as the three parameters of the wear. The performance of three artificial neural networks (MLP, GRNN, and RBF) to estimate W1, W2, and W3 is studied. Among all, GRNN has had the best performance with the maximum error of 0.27, 0.24, and 0.32 mm for W1, W2, and W3, respectively. It shows the high efficiency of the suggested measurement system. 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 method is being used to detect and measure the wear on railway tracks.

Keywords: Rail Defects, Wear, Laser-Camera System, Image Processing, GRNN Artificial Neural Network

تعیین غیرمخرب میزان سایش عمودی و جانبی در سطوح خطوط ریلی

ایمان احدی اخلاقی^{۱*}، حسین نوروزی صحرائی^۲، فرزاد اخلاقی مدیری^۲، سعید کهربائی^۳

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

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

۳- دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران.

*i_a_akhlaghi@sadjad.ac.ir

چکیده

در این مقاله، سیستم غیرمخربی به منظور تشخیص و اندازه‌گیری سایش خطوط ریلی طراحی و ساخته شده است. عدم تشخیص به موقع عیوبی مانند سایش ریل می‌تواند منجر به بروز مشکلات یا عواقب جبران ناپذیری شود. به طور مثال، در صورتی که میزان سایش ریل از مقدار بحرانی عبور کند، ضمن تغییر در هندسه خط، امکان بروز حوادثی همچون خروجی قطار از ریل وجود دارد. در روش پیشنهادی از یک سیستم سخت‌افزاری متشکل از لیزر خطی و دوربین استفاده شده است. در این سیستم تصویر پرتو لیزر خطی که به سطح ریل تابیده می‌شود توسط یک دوربین مناسب ثبت می‌شود. میزان انحراف تصویر پرتو لیزر در مناطق سایش یافته نسبت به مناطق سالم، معیاری از میزان سایش به دست می‌دهد. در روش پیشنهادی پس از به کارگیری روش‌های مختلف پردازش تصویر جهت استخراج الگوی روشن شده توسط لیزر، عملکرد سه شبکه مصنوعی MLP، RBF و GRNN جهت کالیبراسیون و تخمین مقادیر کمی سایش بررسی و مقایسه گردید. در نهایت با توجه به خطای کمتر شبکه GRNN در تخمین هر سه کمیت W1، W2 و W3، از این شبکه به منظور کالیبراسیون استفاده شد. خطای مقادیر پیش‌بینی شده برای پارامترهای سایش W1، W2 و W3 به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ میلی‌متر می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب سیستم اندازه‌گیری پیشنهادی می‌باشد. لازم به ذکر است، در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 که در حال حاضر جهت تشخیص عیوب متداول ریل‌های خطوط شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد مورد استفاده قرار می‌گیرد، این روش پیاده‌سازی و جهت استخراج پارامترهای سایش استفاده می‌شود.

واژگان کلیدی: عیوب ریلی، سایش، سیستم لیزر و دوربین، پردازش تصویر، شبکه عصبی مصنوعی GRNN

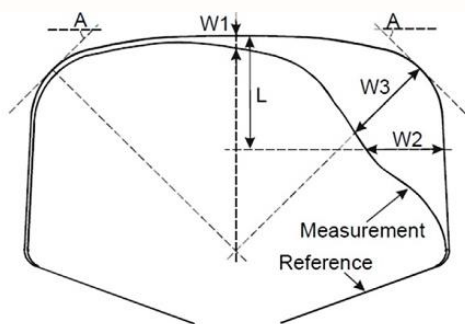
۱- مقدمه

نشأت می‌گیرد. بنابراین تشخیص به موقع و اندازه‌گیری شدت آنها حائز اهمیت فراوان است. منظور از سایش، برداشت نامطلوب مواد از سطوح قطعات درگیر است که در نتیجه حرکت نسبی بین آن‌ها پدید می‌آید. در خطوط ریلی بر اثر اصطکاک و تحت تاثیر تنش‌های تماسی، سطح ریل به مرور زمان ساییده می‌شود. سایش جانبی ریل، یکی از عیوب متداول خطوط ریلی می‌باشد که به طور عمده در قوس‌ها به وجود می‌آید. سایش جانبی، موجب سایش فلنج چرخ و لبه داخلی کلاهک ریل می‌گردد و به خاطر وجود سطح بسیار کوچک محل تماس چرخ و ریل، باعث تولید تنش بسیار بالا همراه با گرمای

با پیشرفت صنعت حمل و نقل ریلی، اهمیت تعمیر و نگهداری خطوط ریلی نیز روز به روز افزایش یافته است؛ چرا که بروز هرگونه مشکل در این حوزه تبعات بسیاری را به دنبال خواهد داشت. بنابراین شیوه‌های نگهداری پیشگیرانه^۱ در بحث تعمیر و نگهداری خطوط ریلی دارای اهمیت است. اما برای انجام هرگونه عملیات پیشگیرانه‌ای، گام اول تشخیص و شناسایی عیوب احتمالی می‌باشد. سایش جانبی و قائم^۲ ریل یکی از مهمترین عیوبی هستند که وقوع آنها در مسیرهای پرتدد خطوط ریلی اجتناب ناپذیر بوده و بسیاری از خسارات جدی این خطوط از آن‌ها

² Side and vertical wear

¹ Preventive maintenance



شکل ۱- مقایسه پروفیل ریل دارای سایش و استاندارد به همراه تعریف پارامترهای اندازه‌گیری سایش (W_3 و W_2 , W_1) [۳].

دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 در مرکز بررسی‌های غیر مخرب دانشگاه سجاد به منظور تشخیص به موقع و دقیق سه عیب سطحی متداول خطوط ریلی طراحی و ساخته شده است و توانایی تشخیص همزمان عیوب کاروگیشن^۳، سایش و ترک‌های ناشی از خستگی لغزشی را به کمک سه روش غیرمخرب متفاوت دارد. در این دستگاه برای تشخیص و اندازه‌گیری سایش خطوط ریلی از روش غیرمخرب مبتنی بر پردازش تصویر استفاده شده است. در این مقاله، به معرفی روش پیشنهادی مورد استفاده در دستگاه RDD-S11 و بررسی کمی عملکرد آن خواهیم پرداخت.

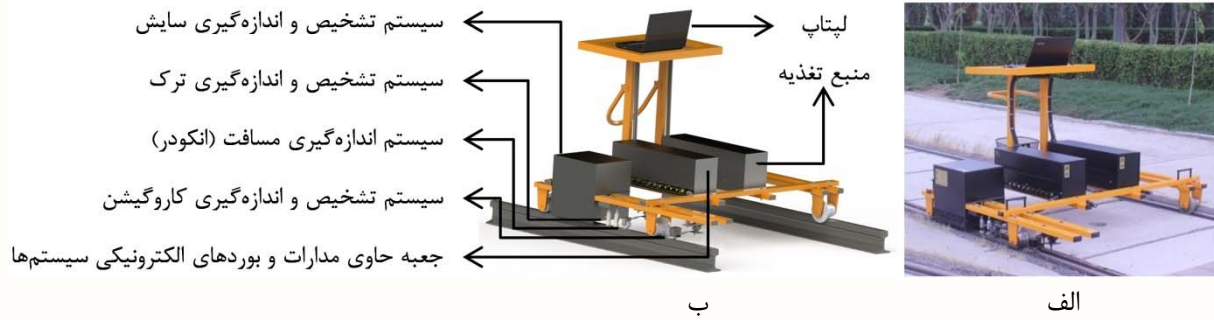
۲- طراحی و ساخت

تصویر واقعی و مدل رایانه‌ای دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 طراحی و ساخته شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. این دستگاه همانطور که در شکل ۲-ب نشان داده شده است، سیستم‌های اندازه‌گیری مختلفی دارد و در آن به منظور تشخیص و اندازه‌گیری سایش از یک سیستم غیرمخرب مبتنی بر لیزر و دوربین استفاده شده است. مدل رایانه‌ای و تصویر واقعی سیستم سخت‌افزاری پیاده‌سازی شده متشکل از لیزر خطی و دوربین در شکل ۳ نمایش داده شده است. دوربین و لیزر توسط یک فیکسچر که در شکل ۳-ج نشان داده شده است، به یکدیگر متصل و بر روی ترولی نصب شده‌اند.

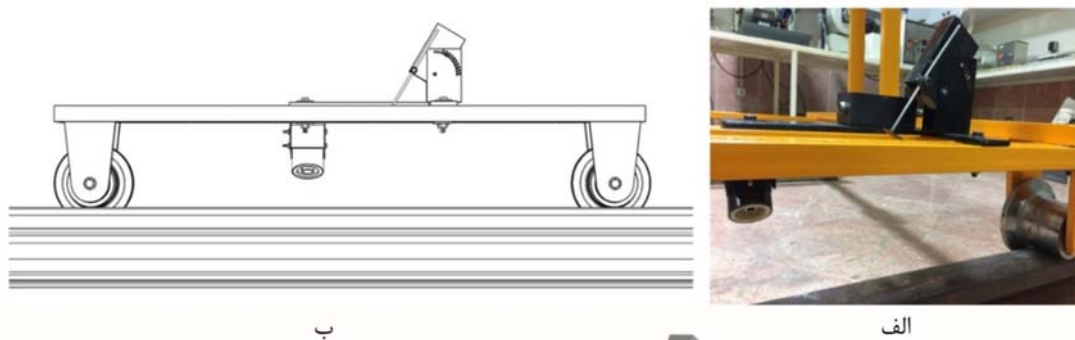
فوق‌العاده در محل تماس می‌گردد. عامل اصلی سایش جانبی در قوس‌ها، نیروی جانب مرکز می‌باشد که باعث فشرده شدن وسیله نقلیه و چرخ‌های آن به ریل خارجی می‌شود. این نیرو تابع جرم وسیله نقلیه، شعاع انحنای قوس و سرعت وسیله نقلیه است. سایش به نیروی اصطکاک بین دو سطح بستگی دارد و نیروی اصطکاک، خود تابع ضریب اصطکاک بین دو سطح و نیروی عمودی فشارنده دو سطح بر هم می‌باشد. سایش قائم یا عمودی نیز، سایش در قسمت بالای کلاهک ریل می‌باشد. این نوع سایش علاوه بر این که در خطوط مستقیم یا تقریباً مستقیم اتفاق می‌افتد، در ریل پایین قوس‌ها نیز مشاهده می‌شود [۱ و ۲]. سایش عمودی یا سایش تاج ریل، می‌تواند از نیروهای جانبی که ناشی از نوسانات جانبی وسیله نقلیه و در نتیجه محور آن می‌باشد، ایجاد گردد. شکل ۱ مقایسه پروفیل ریل دارای سایش را با ریل استاندارد نشان می‌دهد. میزان سایش با توجه به پارامترهای تعریف شده W_1 (سایش در راستای عمودی)، W_2 (سایش در راستای افقی) و W_3 (سایش در راستای ۴۵ درجه) اندازه‌گیری می‌شود. تجاوز میزان هر یک از این پارامترها از حد مجاز، ضمن تغییر در هندسه خط ریل می‌تواند منجر به بروز حوادثی همچون خروج قطار از ریل شود. بنابراین، تشخیص سایش و میزان آن به منظور تعویض ریل قبل از رسیدن به مقدار بحرانی همواره اهمیت فراوانی دارد [۳ و ۴].

به منظور اندازه‌گیری سایش تاکنون روش‌های بسیاری در خطوط ریلی به کار گرفته شده است. این روش‌ها به دو دسته تماسی و غیرتماسی تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]. در روش‌های تماسی، برای اندازه‌گیری سایش از شابلون اندازه‌گیری، کولیس و ابزارهای اندازه‌گیری خاص و ... توسط اپراتور استفاده می‌شود. این روش‌ها کم هزینه و ساده هستند؛ اما در مقابل، زمان‌بر و دارای خطای قابل توجهی هستند. همچنین، در به دست آوردن پارامترهای دقیق پروفیل ریل کارایی خوبی ندارند. در مقابل، روش‌های غیرتماسی می‌تواند سایش را با سرعت بالا و در خطوط ریلی بصورت برخط اندازه‌گیری کنند [۵]. این روش‌ها که عمدتاً بر پایه استفاده از روش‌های پردازش تصویر هستند، روش‌هایی دقیق، سریع و بدون نیاز به تجهیزات زیادی هستند [۶].

³ Corrugation



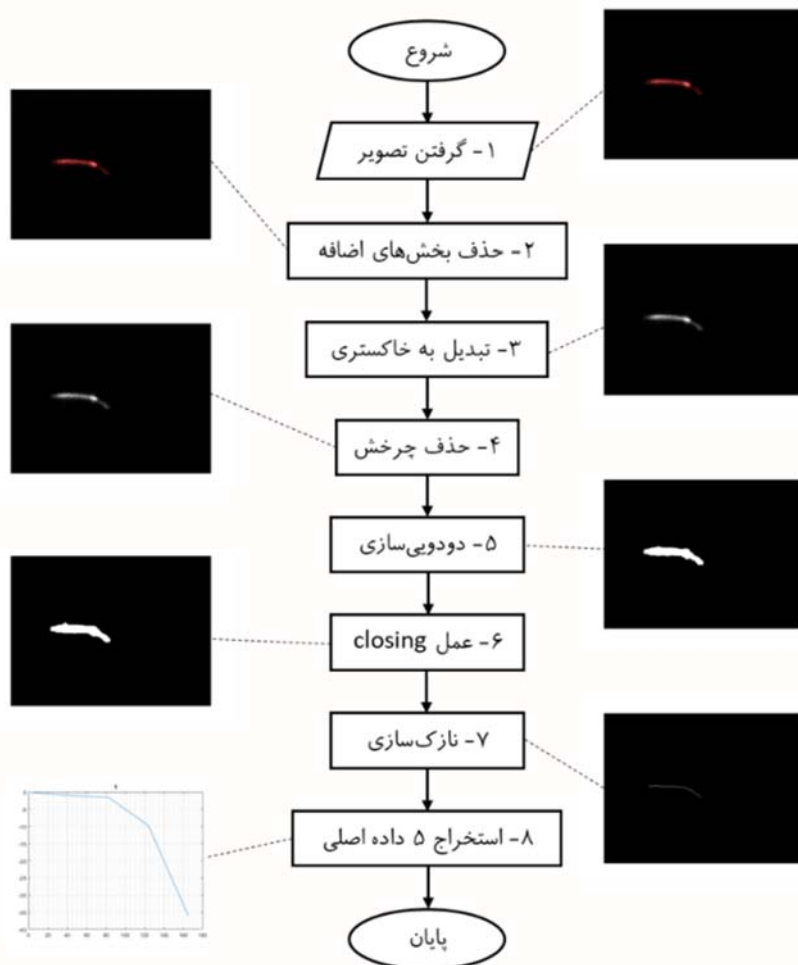
شکل ۲- دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 به همراه سیستم‌های اندازه‌گیری مختلف آن، الف) تصویر واقعی و ب) مدل رایانه‌ای.



شکل ۳- سیستم طراحی شده برای تشخیص و اندازه‌گیری سایش شامل لیزر خطی و دوربین صنعتی نصب شده بر روی ترولی قابل حرکت بر روی خطوط ریلی، الف) تصویر واقعی، ب) مدل رایانه‌ای و ج) فیکسچر لیزر و دوربین طراحی شده.

به جهت انجام پردازش‌های مورد نیاز می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از یک دوربین VGA با نرخ تازه‌سازی ۳۰ فریم بر ثانیه مناسب است. همچنین، دوربین مورد استفاده باید به لحاظ فیزیکی نیز بدنه‌ای مقاوم داشته باشد؛ هر چند در این مورد فیکسچر ساخته شده مقاومت بدنه دوربین را تا حد نیاز ارتقا داده است. تغذیه و انتقال داده دوربین با اتصال آن به لپ‌تاپ دستگاه انجام می‌شود. تغذیه لیزر نیز توسط یک مدار تغذیه که ورودی آن ۲۴ ولت (به کمک دو باتری ۱۲ ولت نصب شده بر روی دستگاه) و خروجی آن ۱۲ ولت ثابت است، انجام می‌شود.

در این فیکسچر، علاوه بر اینکه امکان تنظیم زاویه لیزر و دوربین نسبت به ریل وجود دارد، به کمک قطعات تفلونی نگهدارنده لیزر و دوربین، تاثیر ارتعاشات ناشی از حرکت ترولی بر روی این سیستم به حداقل می‌رسد. در این سیستم از یک لیزر خطی با طول موج ۶۵۰ نانومتر و توان یک چهارم وات استفاده گردید. با توجه به اینکه اساس روش مورد استفاده پردازش تصویر است، اولین گام تهیه تصویر مناسب از سطح ریل می‌باشد. نرخ تازه‌سازی، وضوح، قابلیت تصویربرداری در شب و در حرکت از جمله ویژگی‌هایی است که در کاربرد فوق مهم می‌باشند. نکته مهم دیگر، امکان اتصال دوربین به نرم‌افزار دستگاه، کنترل و انتقال تصویر آن



شکل ۴- فلوجارت بخش نرم‌افزاری و پردازش صورت گرفته و یک نمونه از خروجی‌های هر مرحله.

حذف می‌شود. سپس به دلیل اینکه تصویر دوربین رنگی است و تنها شدت روشنایی برای پردازش‌های بعدی مورد نیاز است، تصویر حاصل تبدیل به یک تصویر خاکستری می‌شود. در مرحله بعد، تاثیرات ناشی از موقعیت و زاویه دوربین حذف می‌گردد و در ادامه تصویر به یک تصویر سیاه و سفید یا باینری^۱ تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه احتمال دارد تصویر لکه لیزر پیوسته و کامل نباشد و نقاطی از آن شدت روشنایی کمتری داشته باشند، عمل Closing انجام و لکه لیزر کامل می‌شود. در نهایت و برای دسترسی به پروفیل الگو ایجاد شده بر روی سطح ریل، بخش‌های اضافی لکه حذف و یک پروفیل نازک ایجاد می‌شود. پنج موقعیت مختلف این پروفیل در نظر گرفته می‌شود و مولفه y آن استخراج می‌شود. این نقاط معرف شکل کلی پروفیل ایجاد شده ناشی از تابش لیزر به سطح ریل می‌باشند که با وقوع

هم‌زمان با حرکت ترولی بر روی خط، در بازه‌های زمانی مشخص تصاویری از پرتو لیزر تابیده شده بر سطح ریل توسط دوربین برداشت می‌شود. میزان انحراف تصویر نور لیزر نسبت به نمونه سالم در مناطق سایش‌یافته، معیاری از میزان سایش به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، هنگامی که پرتو لیزر با سطح ریل سالم برخورد می‌کند، مطابق با پروفیل ریل یک الگو مشخصی را تشکیل می‌دهد که با وقوع سایش، دچار تغییر می‌شود. روی هر یک از تصاویر برداشت شده، برای استخراج داده‌های کمی لازم برای تعیین دقیق میزان سایش، چندین پردازش مختلف صورت می‌پذیرد. در شکل ۴، فلوجارت بخش نرم‌افزاری و پردازش‌های صورت گرفته و یک نمونه از خروجی‌های هر مرحله آورده شده است. در مرحله اول، بخش‌های اضافی تصویر که ناشی از بازتاب پرتو لیزر از قسمت‌های مختلف سطح ریل می‌باشد،

¹ Binary

عصبی مصنوعی MLP، RBF و GRNN و مقادیر اندازه-گیری شده با استفاده از دستگاه پروفیل نگار نشان داده شده است. برای بررسی و مقایسه کارایی شبکه‌ها، از میان ۱۵۰ تصویر گرفته شده و مقادیر اندازه‌گیری شده W1، W2 و W3 متناظر با آنها، ۱۴۹ تصویر (به همراه مقادیر اندازه-گیری شده W1، W2 و W3 متناظر) به عنوان داده‌های آموزشی و یک تصویر باقی‌مانده به عنوان داده آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. برای اطمینان از معتبر بودن نتایج این عمل به تعداد ۱۵۰ بار تکرار گردید و در هر مرحله یکی از تصاویر برای آزمون شبکه‌ها به کار رفت. همان‌طور در شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر W1 و W2 و W3 تخمین زده شده (نقاط قرمز) بسیار نزدیک به مقادیر واقعی (نقاط آبی) می‌باشند که این امر مؤید دقت بالای اندازه-گیری می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر و کمی کارایی شبکه‌ها جذر میانگین مربعات خطا برای ۱۵۰ مرحله گزارش شده است و با توجه به این که در بین این سه شبکه، شبکه GRNN دارای کمتری میزان خطا برای هر سه کمیت W1، W2 و W3 می‌باشد، در فرآیند کالیبراسیون محصول نهایی از شبکه GRNN استفاده شده است. ساختار شماتیک شبکه GRNN مورد استفاده در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اولین لایه شبکه GRNN لایه ورودی است. در لایه ورودی به ازاء هر متغیر ورودی یک سلول در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، از آنجایی که پس از مرحله پردازش اولیه، از تصویر برداشت شده پنج داده خروجی استخراج می‌شود، برای لایه ورودی شبکه پنج سلول عصبی در نظر گرفته می‌شود. در لایه بعدی، که با نام لایه مخفی نیز شناخته می‌شود، به ازاء هر زوج آموزشی یک سلول عصبی با تابع تحریک گوسی اختصاص داده می‌شود. به عنوان مثال، به ازاء ۱۴۹ داده آموزشی موجود، لایه مخفی ۱۴۹ سلول عصبی خواهد داشت. لایه بعدی وظیفه جمع خروجی سلول‌های عصبی لایه مخفی را بر عهده دارد و آخرین لایه شبکه نتیجه لایه جمع را در خروجی ظاهر می‌کند. تعداد سلول‌های عصبی لایه آخر با تعداد پارامترهایی که تخمین زده می‌شوند برابر است. شبکه عصبی GRNN علاوه بر دقت بالا، سرعت آموزش بسیار بالایی نیز دارد و می‌توان از آن در کاربردهای برخت نیز استفاده کرد.

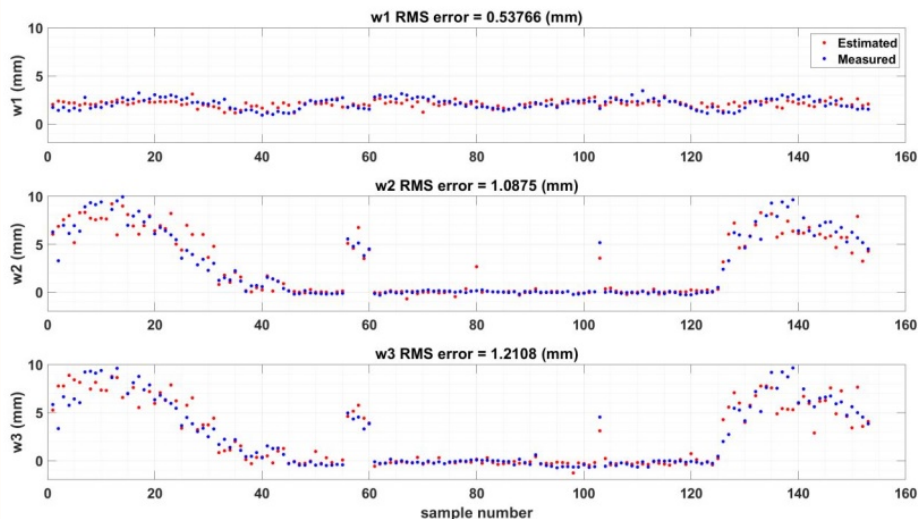
سایش تغییر خواهند کرد. جهت تعیین کمی مقادیر سایش در روش پیشنهادی به فرآیند کالیبراسیون نیز نیاز است. برای این منظور، از یک روش پردازش هوشمند مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. در فرآیند کالیبراسیون، با استفاده از دستگاه پروفیل‌نگار واحد خط و ابنیه شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد (دستگاه پروفیل‌نگار مدل CALIPRI-C40 که به کمک تابش پرتو لیزر بر سطح ریل امکان اندازه‌گیری پروفیل ریل را در صورت نقطه‌ای دارد)، برای ۳۱۳ نقطه از خطوط ریلی موجود داده‌برداری انجام شده و پارامترهای W1، W2 و W3 مربوط به سایش‌های جانبی و قائم ریل در این نقاط تعیین شدند. پروفیل ریل در این نقاط توسط دستگاه عیب‌یاب RDD-S11 نیز برداشت شد. مجموعه داده‌های برداشت شده توسط دستگاه‌های پروفیل‌نگار و عیب‌یاب جهت آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شوند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی مدلی ساده شده از سیستم‌های عصبی واقعی هستند که در سال‌های اخیر جهت پیش‌بینی و تخمین پارامترهای مجهول در فرایندهای متالورژیکی نیز کاربرد زیادی یافته‌اند [۷-۱۰]. اجزای تشکیل‌دهنده این شبکه‌ها، مجموعه‌ای از گره‌ها و اتصالات بین آن‌ها می‌باشد [۱۱]. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی شامل دو مرحله آموزش و آزمون است. در مرحله آموزش، زوج‌های آموزشی (مجموعه‌ای از ورودی‌های نمونه که خروجی‌های مطلوب و ایده‌آل متناظر آنها موجود است) به شبکه اعمال می‌شود و شبکه با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی مشخصی همچون الگوریتم پسانتشار خطا^۱، نظم موجود در این الگوها و نحوه ارتباط دادن ورودی‌ها به خروجی‌های متناظرشان را فرا می‌گیرد [۱۲]. در پژوهش حاضر، برای حذف اثر پرسپکتیو و زاویه دید دوربین از سه شبکه عصبی مصنوعی، شامل: شبکه‌های MLP، RBF و GRNN استفاده شده است و کارایی آنها در تعیین کمی میزان سایش با هم مقایسه شده است.

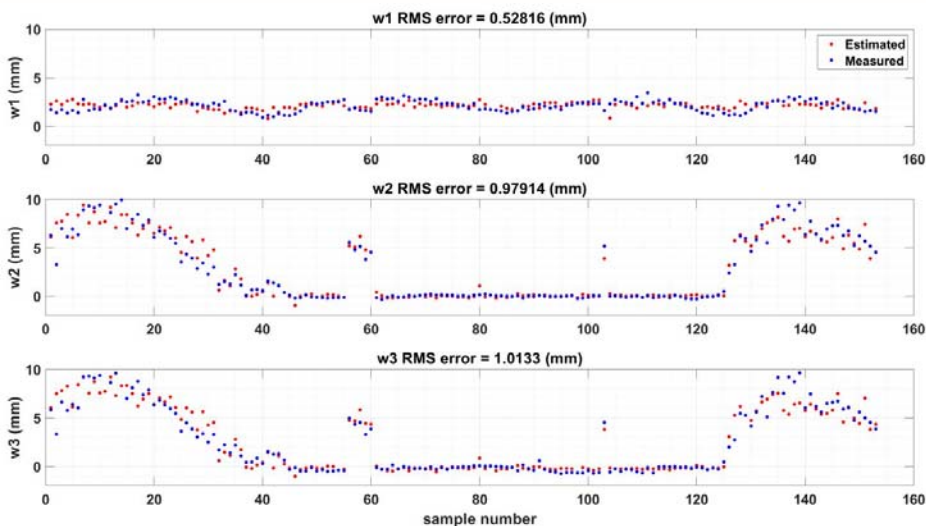
۳- نتایج و بحث

در شکل‌های ۵ تا ۷، مقادیر تخمین زده شده W1 (سایش قائم)، W2 و W3 (سایش جانبی) با استفاده از هر سه شبکه

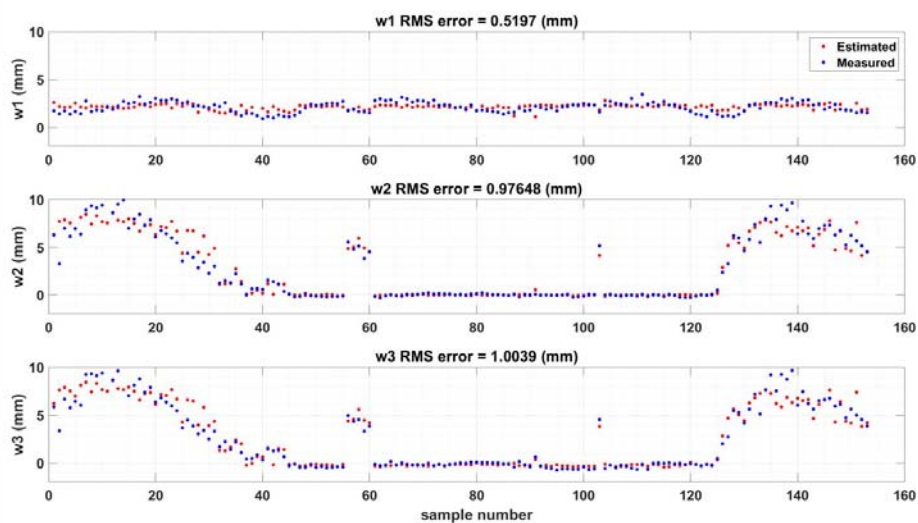
¹ Error back propagation algorithm



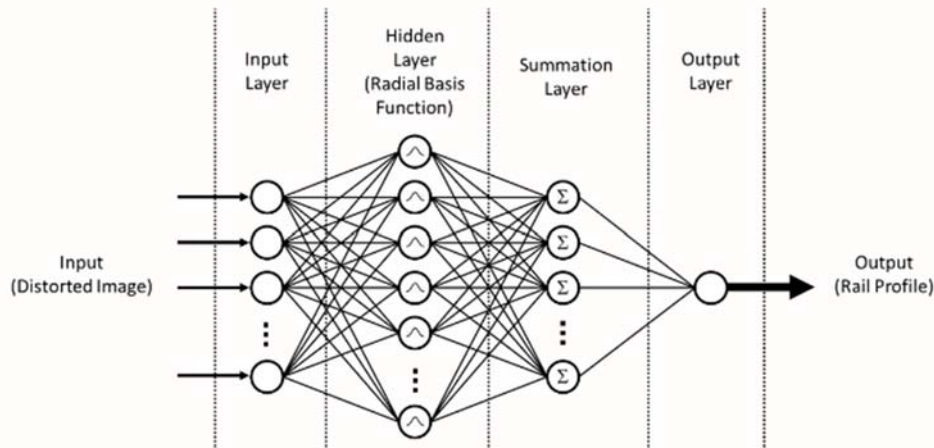
شکل ۵- مقایسه مقادیر تخمین زده شده با استفاده از شبکه MLP و مقادیر واقعی w_1 ، w_2 و w_3 .



شکل ۶- مقایسه مقادیر تخمین زده شده با استفاده از شبکه RBF و مقادیر واقعی w_1 ، w_2 و w_3 .



شکل ۷- مقایسه مقادیر تخمین زده شده با استفاده از شبکه GRNN و مقادیر واقعی w_1 ، w_2 و w_3 .

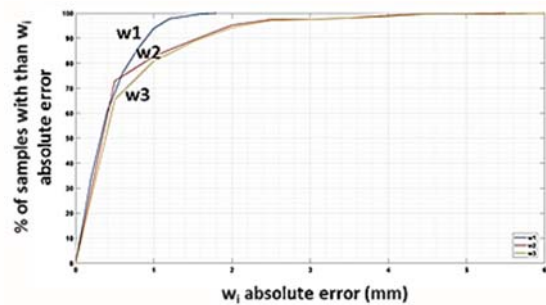


شکل ۸- ساختار شماییک شبکه عصبی GRNN مورد استفاده.

داده‌های آموزشی و یک تصویر باقی‌مانده به عنوان داده آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر $W1$ و $W2$ و $W3$ تخمین زده شده (نقاط قرمز) بسیار نزدیک به مقادیر واقعی (نقاط آبی) می‌باشند، که مؤید این نکته است که شبکه مورد استفاده به خوبی توانایی استخراج مقادیر $W1$ و $W2$ و $W3$ (میزان سایش) از داده‌های مرحله پردازش ابتدایی را دارد.

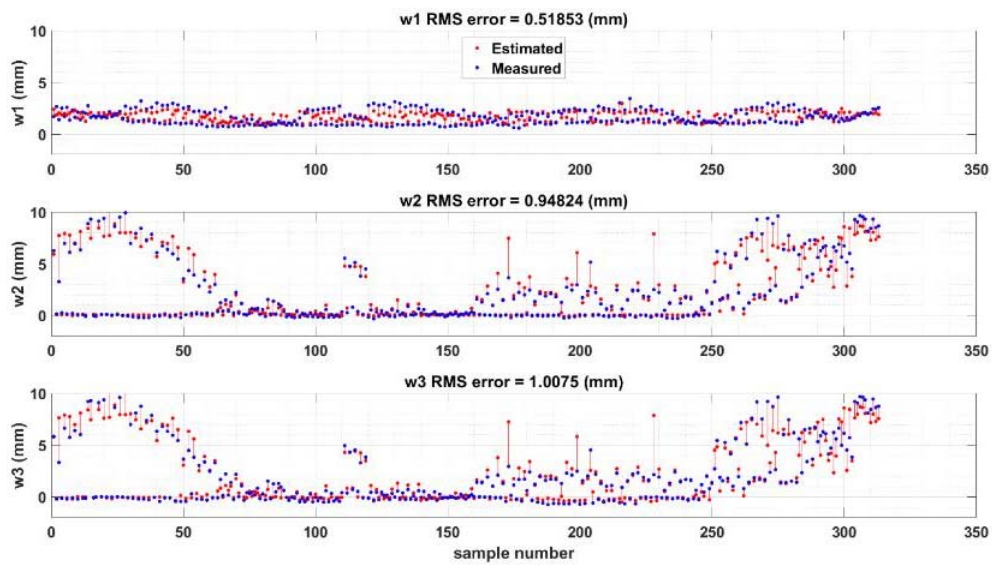
در شکل ۱۱، توزیع و تعداد نمونه‌هایی که خطای تخمین مشخصی دارند آورده شده است. به عنوان مثال، از کل ۳۱۳ داده تخمین زده شده به ترتیب تعداد ۵۹، ۸۰ و ۶۰ مقدار پیش‌بینی شده از $W1$ ، $W2$ و $W3$ با خطای کمتر از ۰/۱ میلی‌متر حاصل شده‌اند. همچنین، برای هر پارامتر سایش مشخص است که اکثر مقادیر پیش‌بینی شده خطایی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر دارند و تعداد بسیار کمی از مقادیر تخمین زده شده دارای خطایی بیشتر از ۱ میلی‌متر هستند. اندازه‌گیری سایش در خطوط ریلی با دقتی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌تواند بسیار راهگشا باشد. زیرا وقوع سایش بصورت تدریجی است و با دنبال کردن تغییرات آن در طول زمان می‌توان قبل از رسیدن به مقادیر بحرانی اقدامات بعدی مانند اصلاح یا تعویض ریل را انجام داد. به منظور کاهش بیشتر خطاها، از بین ۳۱۳ تصویر برداشت شده با سیستم لیزر و دوربین، ۸۰ داده که دارای بالاترین خطا در بررسی‌های قبلی بودند حذف شدند و کارایی شبکه با ۲۳۳ داده باقی‌مانده به طور مجدد بررسی گردید. نتایج نشان داد که خطای مقادیر پیش‌بینی شده از $W1$ ، $W2$ و $W3$ به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ میلی‌متر شده است.

پس از انتخاب شبکه GRNN به عنوان شبکه عصبی مورد استفاده و در ادامه فرایند کالیبراسیون، از اطلاعات سایشی مربوط به ۳۱۳ نقطه خطوط ریلی (که توسط دستگاه پروفیل‌نگار ثبت شده است) در تخمین مقادیر سایش، بهره گرفته شد. شکل ۹ تغییرات درصد مقادیر سایش را بر حسب میزان خطای تخمین زده شده نمایش می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، به ترتیب ۹۵، ۸۲ و ۸۰ درصد مقادیر تخمین زده شده $W1$ ، $W2$ و $W3$ جذر میانگین مربعات خطایی کمتر از یک میلی‌متر داشته‌اند، که برای کاربرد مورد نظر یعنی تعیین کمی میزان سایش بسیار خوب و قابل قبول به نظر می‌رسد.

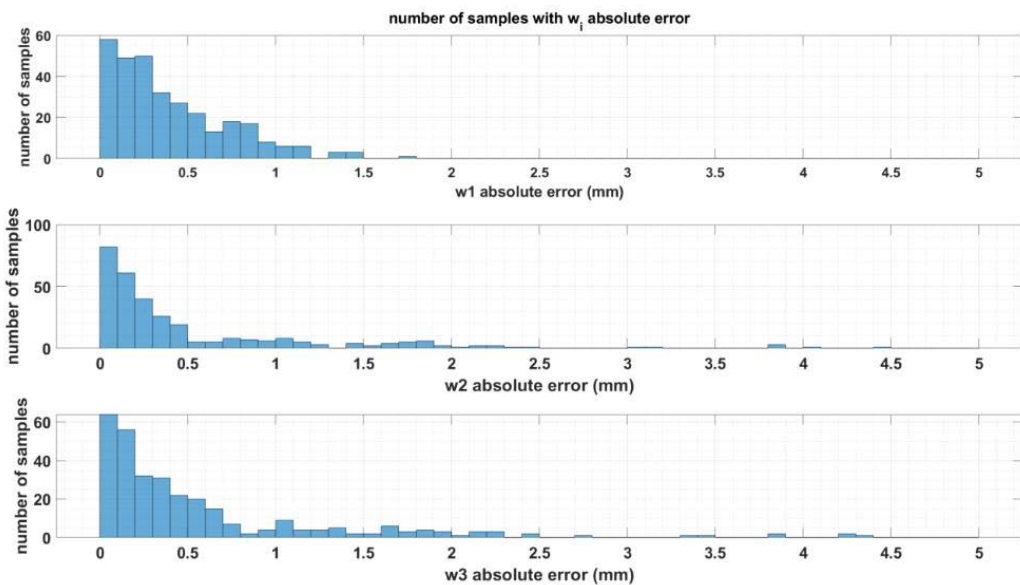


شکل ۹- درصد تعداد نمونه‌ها برای داشتن خطای کمتر از یک مقدار مشخص برای $W1$ ، $W2$ و $W3$.

شکل ۱۰، اختلاف مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی $W1$ ، $W2$ و $W3$ را نشان می‌دهد. برای این منظور، از میان ۳۱۳ تصویر گرفته شده و مقادیر اندازه‌گیری شده $W1$ ، $W2$ و $W3$ متناظر با آنها، در هر مرحله ۳۱۲ تصویر (به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده $W1$ ، $W2$ و $W3$ متناظر) به عنوان



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر تخمین زده شده با استفاده از شبکه GRNN و مقادیر واقعی W_1 ، W_2 ، W_3 .



شکل ۱۱- توزیع و تعداد نمونه‌ها با توزیع خطای تخمین مشخص.

این نتایج، موید عملکرد عالی این دستگاه و روش پیشنهادی در اندازه‌گیری سایش می‌باشد.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش عملی، سیستم غیرمخرب تشخیص و اندازه‌گیری سایش خطوط ریلی طراحی و ساخته شده است. در این سیستم، تصویر پرتو لیزر خطی که به سطح ریل تابیده می‌شود توسط یک دوربین مناسب ثبت و پس از پردازش تصویر، پارامترهای مختلف پروفیل ریل از آن

پس از اطمینان از عملکرد سیستم پیشنهادی، این سیستم در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 پیاده‌سازی گردید. به منظور بررسی عملکرد دستگاه و تحویل آن به شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد، نتایج حاصل از این دستگاه در برداشت‌های بسیار زیادی در طول مسیرهای ریلی این شرکت با نتایج حاصل از اندازه‌گیری سایش با گیج‌های کنترلی و دستگاه پروفیل‌نگار مدل CALIPRI-C40 مقایسه گردید که در تمام موارد خطای اندازه‌گیری دستگاه کمتر از خطای مقادیر پیش‌بینی شده فوق می‌باشد.

- [6] G. Karaduman, K. Mehmet, and A. Erhan, Experimental fuzzy diagnosis algorithm based on image processing for rail profile measurement. in: *Proceedings of 15th International Conference Mechatronika*, pp. 1-6, Prague, Czech Republic, 2012.
- [7] A. Mirzaee, S. Kahrobaee, and I. A. Akhlaghi, Non-destructive determination of microstructural/mechanical properties and thickness variations in API X65 steel using magnetic hysteresis loop and artificial neural networks. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 35(2), pp. 190-206, 2020.
- [8] S. Kahrobaee, S. Ghanei, and M. Kashefi, Using an Artificial Neural Network for Nondestructive Evaluation of the Heat-Treating Processes for D2 Tool Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(5), pp. 3001-3011, 2019.
- [9] S. Kahrobaee, H. Norouzi Sahraei, and I. A. Akhlaghi, Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of heat treated H13 tool steel using magnetic hysteresis loop methodology. *Research in Nondestructive Evaluation*, 30 (5), pp. 303-315, 2019.
- [10] S. Kahrobaee, M. S. Haghghi, and I. A. Akhlaghi, Improving nondestructive characterization of dual phase steels using data fusion. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 458, pp. 317-326, 2018.
- [11] K. L. Priddy, and E. K. Paul, Artificial neural networks: an introduction. *SPIE press*, Vol. 68, 2005.
- [12] N. Karayiannis, and A. N. Venetsanopoulos, Artificial neural networks: learning algorithms, performance evaluation, and applications. *Springer Science & Business Media*, Vol. 209, 1992.

استخراج خواهد شد. برای حذف اثر پرسپکتیو، زاویه دید دوربین و تعیین کمی میزان سایش، از سه شبکه عصبی مصنوعی، شامل: شبکه‌های MLP، RBF و GRNN استفاده شد و با توجه به این که در بین این سه شبکه، شبکه GRNN دارای کمترین میزان خطا برای هر سه کمیت W1، W2 و W3 می‌باشد، از این شبکه برای کالیبراسیون استفاده شد. پس از کالیبراسیون این سیستم و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی GRNN، نتایج نشان می‌دهد که خطای مقادیر پیش‌بینی شده پارمترهای سایش W1، W2 و W3 به ترتیب برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ میلی‌متر می‌باشد. پس از پیاده‌سازی این روش در دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی و اندازه‌گیری سایش و مقایسه آن با نتایج حاصل از گیج‌های کنترلی و دستگاه پروفیل نگار، عملکرد دستگاه و روش پیشنهادی با خطایی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده برای تعداد بسیار زیادی نقطه از خطوط ریلی شرکت بهره‌برداری قطارشهری مشهد، مورد تایید قرار گرفت. شایان ذکر است، دستگاه عیب‌یاب خطوط ریلی RDD-S11 در خطوط یک و دو شرکت بهره‌برداری قطارشهری مشهد در حال استفاده است.

۵- قدردانی و تشکر

بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از پرسنل محترم شرکت بهره‌برداری قطارشهری مشهد به ویژه ریاست محترم واحد خط و ابنیه، جناب آقای مهندس حسنی و همکار ایشان جناب آقای مهندس خسروی به پاس راهنمایی‌های ارزشمندشان در مسیر انجام این پروژه ابراز می‌داریم.

۶- منابع

- [1] I. Povilaitienė, and I. Podagėlis, Research into rail side wearing on curves. *Transport*, 18 (3), pp. 124-129, 2003.
- [2] X. Jin, X. Xiao, Z. Wen, J. Guo, and M. Zhu, An investigation into the effect of train curving on wear and contact stresses of wheel and rail. *Tribology International*, 42 (3), pp. 475-490, 2009.
- [3] F. Braghin, S. Bruni, and G. Diana, Wheel-rail contact: wear effects on vehicle dynamic behaviour. In: 2. *World Tribology Congress*, pp. 271-276, Vienna, Austria, 2001.
- [4] U. Olofsson, and T. Telliskivi, Wear, plastic deformation and friction of two rail steels—a full-scale test and a laboratory study. *Wear*, 254 (1-2), pp. 80-93, 2003.
- [5] Z. Liu, S. Junhua, W. Heng, and Z. Guangjun, Simple and fast rail wear measurement method based on structured light. *Optics and Lasers in Engineering*, 49 (11), pp. 1343-1351, 2011.