

Improved maintenance planning of railway tracks based on onboard vibration measurements using smartphones

Babak Javadi¹✉, Saeed Kiaahmadi², Amirhosein Abasi³ and Mohammadreza Abdali⁴

1. Corresponding Author, Assistant of Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran Email: babakjavadi@ut.ac.ir
2. Master of industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran, Email: s.kiaahmadi@gmail.com.
3. Bachelor of Industrial engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran, Email: amirhosein.abasi@ut.ac.ir.
4. Master of industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran, Email: mohammad.abdali@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 1 August 2024 Received in revised form 23 April 2025 Accepted 4 August 2025 Published online 21 August 2025 Keywords: Horizontal track geometry, vertical track geometry, smartphone, vibration, track acceleration.	With the increase in train speed, railway traffic has grown significantly in terms of both passenger numbers and cargo weight. Speed, weight, and rail traffic collectively impact rail track quality. The expanding rail network has accelerated the rate of track geometry changes, leading to deteriorating track conditions. Severe track geometry deviations pose significant risks, including train derailment. Consequently, railway companies invest substantial resources in regular track inspections to mitigate these risks. This article proposes a cost-effective and reliable method for continuous track geometry monitoring during every journey. By utilizing the widespread availability of smartphones, we aim to record wagon vibrations to predict rail conditions in both vertical and horizontal dimensions. This approach can drastically reduce maintenance costs by efficiently identifying areas requiring urgent attention.
Cite this article: Javadi, B. & et al, (2025), Improved maintenance planning of railway tracks based on onboard vibration measurements using smartphones. <i>Engineering Management and Soft Computing</i>, 11 (1). 48-81. DOI: https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11229.1204	
	© The Author(s) DOI: 10.22091/jemsc.2025.11229.1204 Publisher: University of Qom

1) INTRODUCTION

Rail transportation, recognized as one of the most cost-effective and essential modes of transport, has experienced a continuous increase in rail travel demand each year. To prevent the deterioration of travel quality and railway tracks, maintenance and repair units play a crucial role. This study aims to reduce maintenance and repair costs by utilizing data collected through smartphones and predicting the condition of railway tracks.

Maintenance and repair expenses in railway routes are considerably high, and failures often escalate to the point of breakdown, resulting in substantial financial and human losses. With the development of rail transport and increasing train speeds, maintenance strategies have evolved from reactive maintenance to preventive, and more recently, predictive maintenance approaches.

Three major challenges are commonly associated with the maintenance of railway tracks:

- The high cost of purchasing and operating track measurement vehicles.
- The extremely slow pace of data collection by these measurement vehicles.
- The long return intervals of measurement vehicles for subsequent inspections.

This study addresses several key questions, including:

- Is it possible to eliminate the use of expensive track measurement vehicles from maintenance units and replace them with alternative technologies?
- Can a low-cost model be developed for collecting railway track data?
- Is there a policy or methodology for verifying the accuracy of the collected data?
- Is it feasible to monitor track conditions without disrupting railway operations or incurring losses for rail transport companies?
- Can preventive maintenance tasks be performed more rapidly?

This research was conducted in the North-East 2 rail transport network of the Islamic Republic of Iran Railways, focusing on the 66-kilometer route from Gorgan station to Galougah station. This is a single-track line used for both freight and passenger services. The main focus of the study was the segment between kilometers 429 to 441, specifically from Bandar-e-Gaz to Galougah, over a duration of 100 minutes, using a sleeper-type passenger train.

The limitations encountered in this study include:

- Lack of real-time access to data from track measurement vehicles.
- No control over the train's speed during the trips.
- Lack of control over the timing and location of train stops, which created significant difficulties, particularly in aligning the collected data with the start and end points of the route.
- A six-month time gap between archived data from the railway authority and the data collected during the field study, during which track geometry is likely to have changed, introducing potential errors into the results.

This paper is structured as follows: Section 1 introduces the research topic. Section 2 presents a review of the related literature. Section 3 describes the methodology applied in solving the problem. Section 4 reports the results and provides a comparative analysis of the findings. Finally, Section 5 presents the conclusions drawn from this study.

2) Research Innovation

In this study, for the first time, a telecommunications system and a vibration-recording device—such as a smartphone—have been employed as data collection tools. The objective was to analyze the geometric condition of the railway tracks using the collected data and, in the event of track degradation, notify the preventive maintenance unit before a failure occurs. This approach enables low-cost, highly repeatable monitoring of track geometry and aims to minimize the financial losses incurred by railway companies.

3) Solution Method

3-1) Equations

Subtracting the actual standard deviation value from the predicted value indicates the error in Eq. (1). Dividing the sum of the absolute values of these errors by the total of the actual standard deviations provides the percentage of prediction error.

$$Error = \frac{\sum |S_i - \hat{S}_i|}{\sum S_i} \quad (1)$$

Below in Eq. (2) is the mathematical model for predicting the maximum standard deviations of the left and right rails in measuring the AL parameter, which has been referred to as the geometric conditions along the horizontal axis.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{20} \beta_i * x_i = 2.0639x_1 - 1138.2x_2 + 1888.2x_3 + \dots - 15912x_{20}$$

4) Conclusion

This study utilizes seismic data recorded by passengers' smartphones to monitor and plan railway track maintenance. The proposed low-cost method accurately identifies damaged sections, reducing the need for conventional inspections. Results indicate improvements in safety, cost reduction, and operational efficiency. Future work should incorporate AI algorithms and consider environmental factors to enhance data analysis accuracy.

5) Tables and Figures

Table 1 provides a concise overview of previous research studies.

Table 1. Literature Review Summary

Author / Year	Objective / Innovation	Tools Used	Algorithms / Techniques
Rossi & Nicolini (2003)	Prediction of high-speed train vibrations	Weight, speed, rail geometry	Analytical model
McAnaw (2003)	Ride quality monitoring	Macminder / Mactrack	AVI + accelerometer
Bahrekazemi (2004)	Estimation of ground vibrations near railway lines	Distance, speed, attenuation	Empirical model
Kaito et al. (2006)	Under-car vibration analysis	GPS + accelerometer	Acceleration analysis
Weston et al. (2007)	Sensor placement optimization	Axle-mounted installation	Vibration analysis
Mori et al. (2010)	Temporary GPS-based installation	GPS + map	Routing
Lee et al. (2011)	High-accuracy data acquisition	Optical system	Optical sensing
Heirich et al. (2011)	Low-cost system design	IMU	Sensor fusion
Bokhman et al. (2014)	Lateral displacement measurement	SINS + laser	Inertial navigation
Kratochwille (2019)	High-precision ICE measurement	Accelerometer + laser + GPS	Multi-sensor integration
Antognoli et al. (2020)	Non-stop UGMS monitoring	Permanent installation	Continuous monitoring
Tsunashima et al. (2023)	Track monitoring using smartphones	Smartphone	Signal analysis
Meng et al. (2023)	IoT-based monitoring	Sensors, smartphone	Real-time processing
Mohammadzadeh et al. (2024)	Algorithm comparison for track condition detection	Track data + frequency	Machine learning, spectral analysis
Bababeik et al. (2024)	Enhanced reversibility in emergency response	Emergency localization	Optimization
This Study (2025)	Smartphone-based track monitoring	Smartphone accelerometer	Vibration analysis

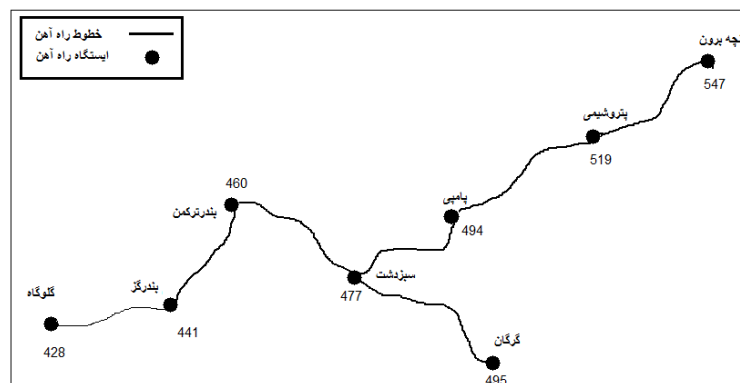


Figure 1. Number of patents on nanotechnology with time.

This study was conducted on the North-East railway network, as illustrated in Figure 1. The numbers shown beneath each station represent the kilometer markers, measured relative to the point of origin, which is Tehran Railway Station.

	x	LLL	LLR	max	ALL	ALR	max
نمونه اول	1.25	0.004	0.021	0.025	0.26	0.0012	0.0004
نمونه دوم	0.0015	0.0025	0.068	0.0026	0.0125	0.0015	0.0015
	:	:	:	:	:	:	:
	:	:	:	:	:	:	:
	:	:	:	:	:	:	:
نمونه تست‌شده	1.00025	0.0125	0.0024	0.0158	0.2165	0.0005	0.0012

Figure 2. Categorized Data Matrix and Description of Its Components.

Figure 2 illustrates the collected data and the method used for their categorization. The data in the first, fourth, and seventh columns of this matrix are the most utilized in the implementation of the project and in the modeling processes. Each row of the matrix corresponds to a 60-meter segment used as a sample. In total, 610 overlapping 60-meter segments with a 40-meter overlap were extracted, providing 610 distinct samples for analysis.

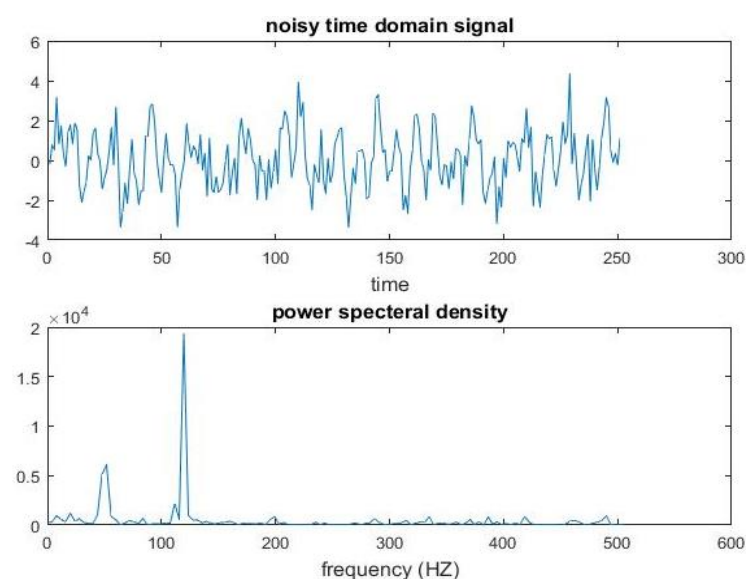


Figure 3. Transformation of Data from Time Domain to Frequency Domain.

For example, the first part of Figure 3 illustrates a wave composed of two sinusoidal signals with frequencies of 50 Hz and 120 Hz, along with a portion of noise generated over time. Although this information is not directly discernible from the time-domain plot, it becomes clearly evident in the second plot through the application of the Fourier Transform.

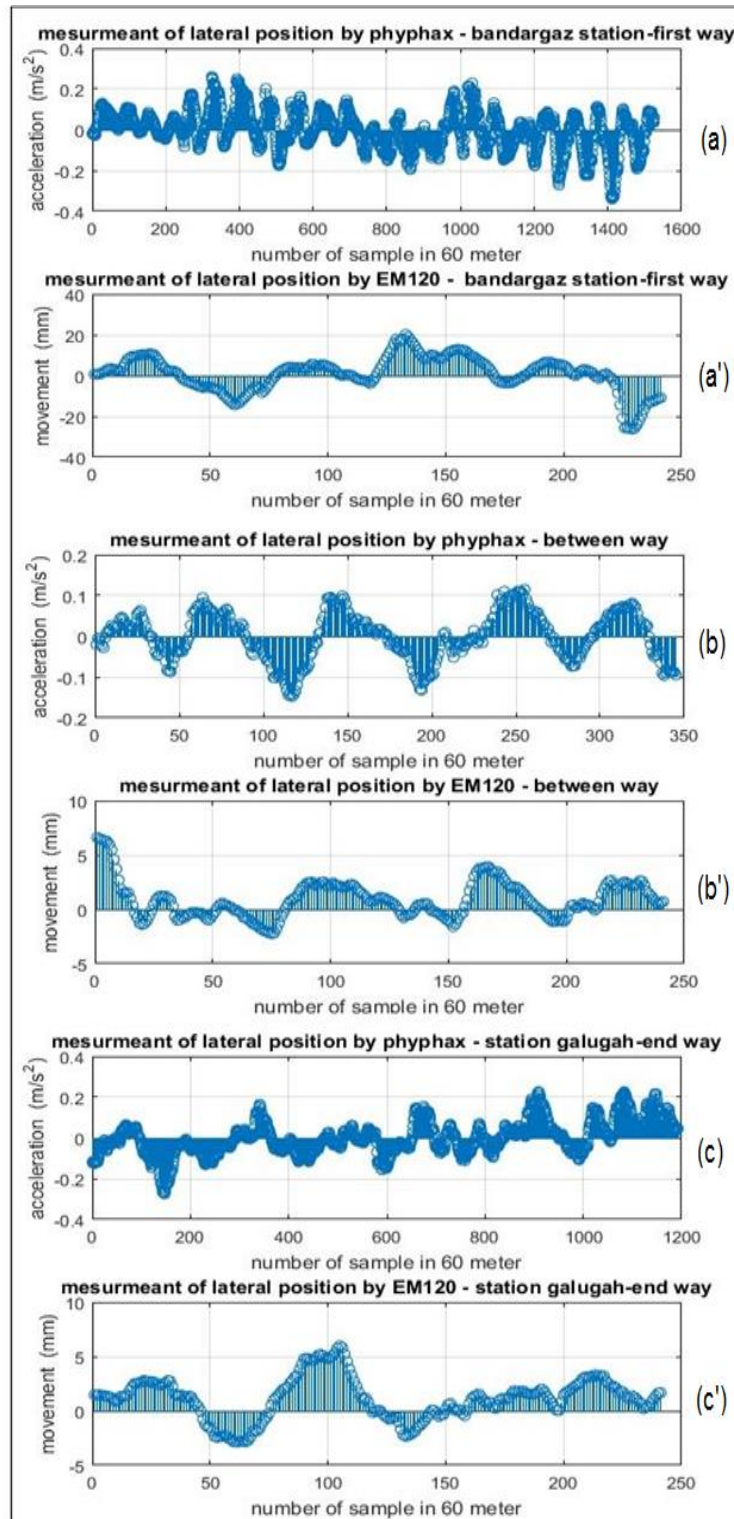


Figure 4. Horizontal Data Collection by Firefox and EM120 at the Beginning, Middle, and End of the Route.

In Figures 3 and 4, sections a and a' respectively represent the horizontal condition of the railway tracks, with the former showing data collected using Firefox and the latter using the EM120 system. At the beginning of the route, the EM120 data recorded standard deviations of 20 and 30, indicating a poor track condition, as standard deviations in the range of 8 to 10 are already considered critical.

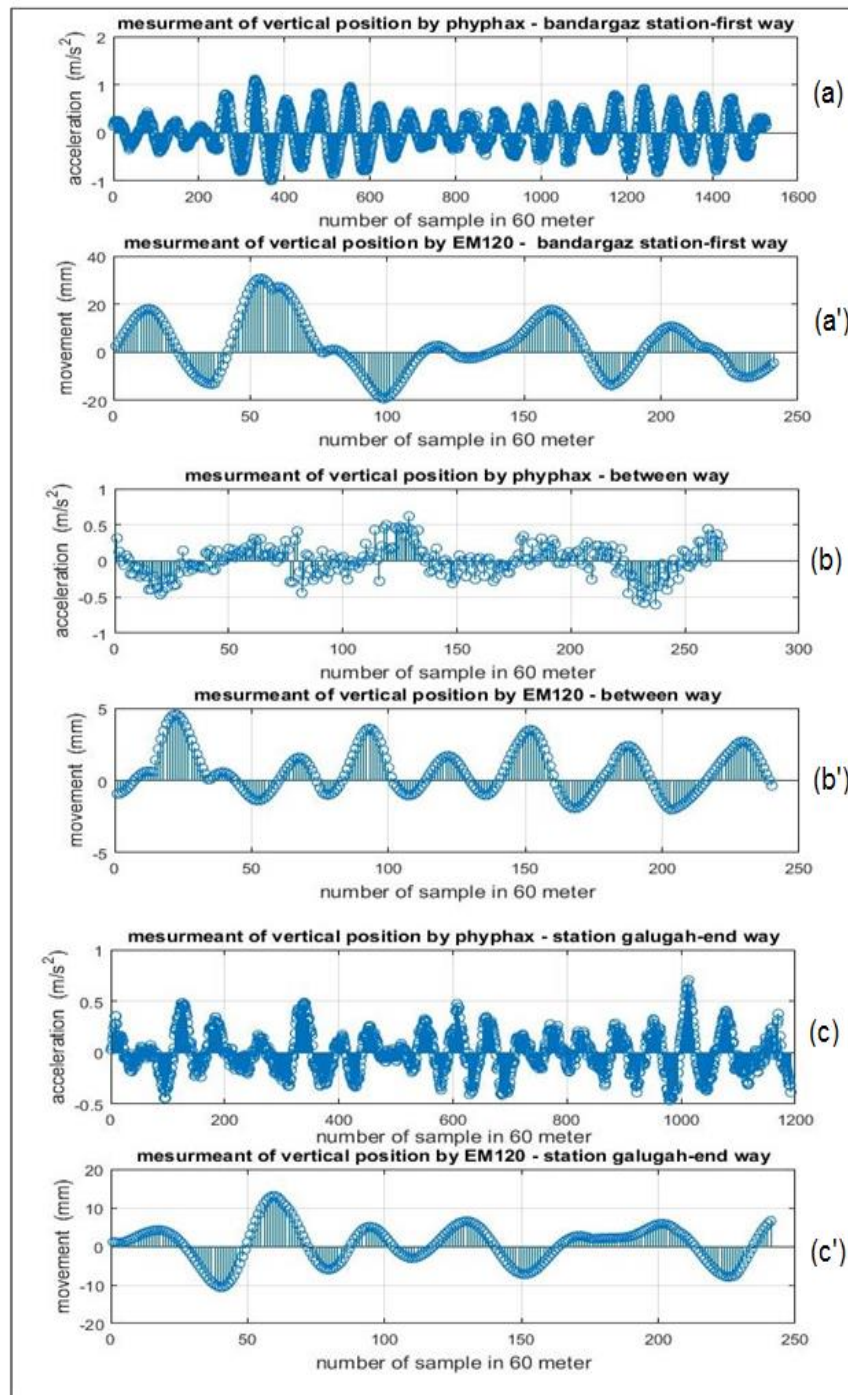


Figure 5. Data along the vertical axis using FiveFox and EM120 at 60 meters at the beginning, middle, and end of the path.

If the train passes near Bandar-e-Gaz station at its normal speed, larger acceleration values will be recorded, indicating a greater decline in track quality. It should be noted that the EM120 system moves at a constant speed throughout data collection. The results are presented in Figure 5.

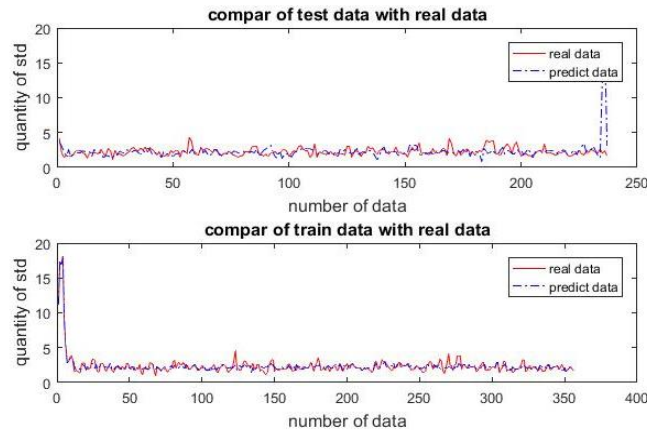


Figure 6. Comparison of the actual standard deviation of the data collected with EM120 and its predicted values along the horizontal axis.

In machine learning for modeling, 70% of the input data is randomly selected as training data, and the model is built using this data. The model is then evaluated using the remaining 30% of the test data. In this project, 70% of the data collected by FiveFox, after performing the pwelch operation, was selected for modeling using the dividrand function in MATLAB. A model was designed between the two data sets using the plsregress function, as shown in Figure 6.

	train_data_corr	test_data_corr	percent_train_error	percent_test_error
run1	0.91794	0.83785	14.89	22.61
run2	0.91264	0.86948	14.911	20.256
run3	0.93949	0.52101	14.388	28.895
run4	0.58081	0.54706	13.704	28.426
run5	0.96108	0.032689	13.875	26.376
run6	0.95075	0.59598	15.109	24.738
run7	0.94475	0.79187	14.437	21.827
run8	0.93439	0.77648	14.521	23.881
run9	0.9088	0.90794	15.373	19.967
run10	0.94135	0.68419	13.708	26.023
run11	0.91982	0.56748	14.211	29.049
run12	0.9064	0.39571	15.094	27.061
run13	0.91249	0.56255	15.26	27.24
run14	0.95974	0.41362	13.776	23.459
run15	0.94929	0.54913	13.857	25.833
run16	0.94038	0.72799	14.408	24.519
run17	0.92866	0.88657	13.655	21.774
run18	0.94322	0.72815	13.79	25.178
run19	0.95523	0.30357	14.089	26.83
run20	0.95656	0.52431	14.306	21.751
mean_runs	0.9332	0.621	14.308	21.754

Figure 7. Various correlation values and error percentages for the geometric parameter along the horizontal axis.

Figure 7 shows the percentage of error and the correlation between the actual and predicted data for the training and test data along the vertical axis (LL). To increase reliability, the model was executed more than 30 times, and the average percentage of error and correlation are reported.

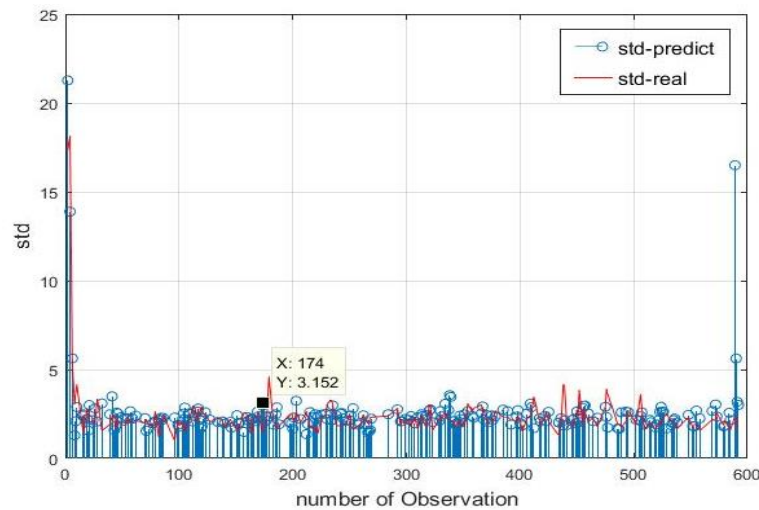


Figure 8. Predicted and actual standard deviation values for the test data.

Figure 8 also presents the actual and predicted standard deviation values for the 60-meter rail segments. The objective is to identify potentially defective sections of the rail and dispatch maintenance and inspection teams accordingly. The average predicted standard deviation is 2.5, with values exceeding this average indicating suspicious rail sections.

All the processes described in Sections 4 and 5 have also been applied to the horizontal axis, leading to the following charts and results. Arguably, the outcome of the entire project is encapsulated in what is presented in Figure 9.

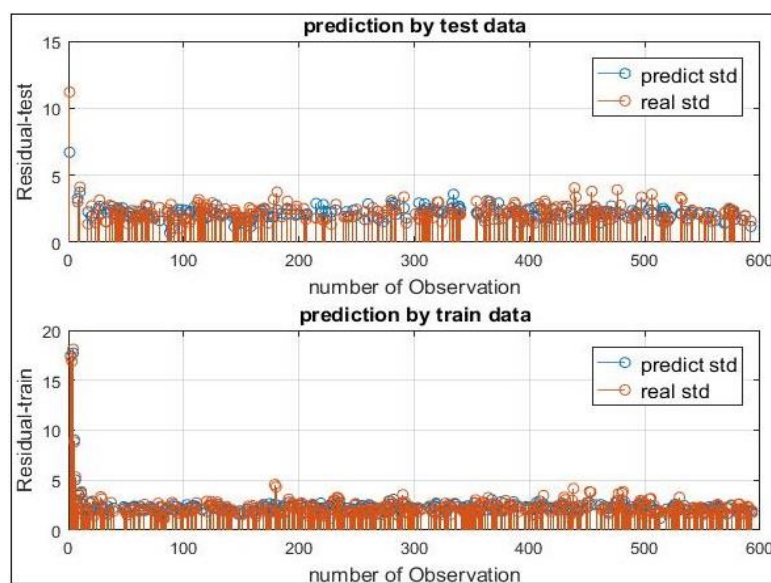


Figure 9. Bar chart of predicted and actual standard deviation values for the training and test data.

ACKNOWLEDGEMENTS

Special thanks and sincere appreciation to the esteemed editor and the respected reviewers whose valuable comments significantly contributed to the improvement of this research.

REFERENCES

- Andian Technologies, www.andian.com. 2014.
- Antognoli, M., Marinacci, C., Ricci, S., & Rizzetto, L. (2020). Requirement specifications for track measuring and monitoring systems. *Ingegneria Ferroviaria*, 2020, 841–864.
- Bababeik, M., Behnia, K., & Khademi, N. (2024). Increasing the Resilience of Rail Network through the Optimal Location of Relief Trains. *Journal of Transportation Research*, 21(2), 217–232. https://www.trijournal.ir/article_96254.html
- Bahrekaezemi, M. (2004). Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction.
- Bokhman, E. D., Boronachin, A. M., Filatov, Yu. V., Larionov, D. Yu., Podgornaya, L. N., Shalymov, R. V., & Zuzev, G. N. (2014). Optical-inertial system for railway track diagnostics. 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), 1–17. <https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2014.7049477>
- Ckroyd, P., Angelo, S., & Stevens, J. (2002). Remote ride quality monitoring of Acela train set performance. ASME/IEEE Joint Railroad Conference, 171–178. <https://doi.org/10.1109/RRCON.2002.1000109>
- Heirich, O., Lehner, A., Robertson, P., & Strang, T. (2011). Measurement and analysis of train motion and railway track characteristics with inertial sensors. 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1995–2000. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6082908>
- Kaito, K., Ishii, H., Fujino, Y., & Mizuno, Y. (2006). The Study of Train Intelligent Monitoring System Using Acceleration of Ordinary Train. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54676958>
- Kratochville, R. (2019, Aug). ICE-S Vehicle reaction measurement and track geometry measurement on the same measuring train Results of the comparison of the two different track inspection methods.
- Lee, J. S., Choi, S., Kim, S. S., Kim, Y. G., Kim, S. W., & Park, C. (2011). Track condition monitoring by in-service trains: A comparison between axle-box and bogie accelerometers. IET Conference Publications, 2011(581 CP). <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0586>
- McAnaw, H. E. (2003). The system that measures the system. NDT & E International, 36(3), 169–179. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00055-5)
- Meng, Q., Lu, P., & Zhu, S. (2023). A Smartphone-Enabled IoT System for Vibration and Noise Monitoring of Rail Transit. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(7), 5678–5687. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3233051>
- Mohammadzadeh, S., Heydari, H., Karimi, M., & Mosleh, A. (2024). Correlation Analysis of Railway Track Alignment and Ballast Stiffness: Comparing Frequency-Based and Machine Learning Algorithms. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 11(1), 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100234>
- Molodova, M., Li, Z., Nunez, A., & Dollevoet, R. (2014). Automatic detection of squats in railway infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), 1980–1990. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2307955>
- MORI, H., TSUNASHIMA, H., KOJIMA, T., MATSUMOTO, A., & MIZUMA, T. (2010). Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 3(1), 154–165. <https://doi.org/10.1299/jmtl.3.154>
- Rossi, F., & Nicolini, A. (2003). A simple model to predict train-induced vibration: theoretical formulation and experimental validation. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(3), 305–322. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00005-2)
- The website of the Islamic Republic of Iran Railways.
- Tsunashima, H., Honda, R., & Matsumoto, A. (2023). Track Condition Monitoring Based on In-Service Train Vibration Data Using Smartphones. In *Railway Infrastructure Maintenance* (pp. 1–20). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.108123>
- Weston, P. F., Ling, C. S., Roberts, C., Goodman, C. J., Li, P., & Goodall, R. M. (2007). Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 75–88. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT65>

رویکرد بهبود یافته برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی براساس لرزه نگاری در داخل کابین قطار با دستگاه های تلفن همراه

بابک جوادی^۱✉، سعید کیا احمدی^۲، امیر حسین عباسی^۳ و محمدرضا ابدالی^۴

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: babakjavadi@ut.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: s.kiaahmadi@gmail.com

۳. کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: amirhosein.abasi@ut.ac.ir

۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشکده گان فارابی، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: mohammad.abdali@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ کلیدواژه ها: برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات، پارامترهای هندسی، پایش وضعیت، خطوط حمل و نقل ریلی، لرزه نگاری	با افزایش سرعت قطارها، حجم تردد ریلی بطور قابل توجهی افزایش یافته است. این افزایش هم در تعداد مسافران و هم در میزان بار منتقل شده، مشهود است. عوامل مختلفی مانند سرعت حرکت قطارها، وزن بار و تردد ریلی بر کیفیت مسیر ریلی تاثیر گذار هستند. توسعه شبکه ریلی باعث افزایش نرخ تغییرات هندسی مسیر شده و در نتیجه کیفیت مسیر به مرور زمان کاهش می یابد. تغییرات شدید هندسی مسیر می تواند خطرات جدی مانند خروج قطار از ریل را به همراه داشته باشد. به همین دلیل، شرکت های ریلی هزینه های هنگفتی را صرف بازرسی دوره ای مسیر می کنند. این پژوهش روشی نوین و کم هزینه برای پایش مستمر وضعیت مسیر ریلی ارائه می دهد. در این روش، از قابلیت های تلفن های همراه مسافران برای ثبت لرزش های واگن در جهت های عمودی و افقی استفاده می شود. با تحلیل این داده ها، می توان وضعیت هندسی مسیر را پیش بینی کرده و نواحی با مشکل را شناسایی نمود. این روش نه تنها هزینه های بازرسی را به شدت کاهش می دهد بلکه امکان شناسایی زودهنگام مشکلات و جلوگیری از بروز حوادث را فراهم می کند.

استناد: جوادی، بابک و همکاران. (۱۴۰۴). «رویکرد بهبود یافته برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی براساس لرزه نگاری در داخل کابین قطار با دستگاه های تلفن همراه». مدیریت مهندسی و رایانش نرم، دوره ۱۱ (۱). صص: ۴۸-۸۱. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2025.11229.1204>



(۱) مقدمه

حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از ارزان ترین و مهمترین وسایل حمل و نقل، سالیانه با افزایش سفرهای ریلی مواجه است. برای جلوگیری از کاهش کیفیت سفرها و همچنین ریل های راه آهن از واحدهای نگهداری و تعمیرات استفاده می شود. این مطالعه به دنبال کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات با استفاده از داده های جمع آوری شده از گواهی های هوشمند و پیش بینی وضعیت ریل است. هزینه های نگهداری و تعمیرات در مسیرهای ریلی بسیار بالاست و اغلب خرابی ها تا نقطه شکست پیش می روند که منجر به هزینه های جانی و مالی زیادی می شود. با توسعه حمل و نقل ریلی و افزایش سرعت قطارها، روش های نت (نگهداری و تعمیرات) از تعمیرات واکنشی به نت پیشگیرانه و سپس به نت پیشگویانه تغییر یافته است. می توان گفت سه مشکل اساسی در نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی وجود دارد:

- مشکل اول: هزینه خرید و عملیات ماشین های اندازه گیر
 - مشکل دوم: سرعت بسیار کم جمع آوری داده از خطوط ریلی توسط این ماشین های اندازه گیری
 - مشکل سوم: مدت زمان طولانی بازگشت ماشین اندازه گیری به خطوط ریلی برای بازرسی مجدد
- همچنین سئوالاتی که سعی شده است در این مقاله به آن پاسخ داده شود، شامل موارد ذیل است:
- آیا می توان ماشین های اندازه گیری خطوط ریلی که بسیار گران قیمت می باشند را از واحد نگهداری و تعمیرات حذف کرد و تکنولوژی دیگری برای آن جایگزین کرد؟
 - آیا می توان مدل ارزانی ارائه داد که با آن بتوان اطلاعات خطوط ریلی را جمع آوری کرد؟
 - آیا خط مشی برای راستی آزمایی اطلاعات جمع آوری شده وجود دارد؟
 - آیا ممکن است بدون اینکه خطوط ریلی را از شبکه خارج کنیم و ضرری را متوجه شرکت های حمل و نقل ریلی کنیم، کار پایش وضعیت را انجام دهیم؟
 - آیا این امکان وجود دارد که با سرعت بالاتری کار نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را انجام دهیم؟
- در پژوهش میدانی خود در شبکه حمل و نقل ریلی شمال شرق ۲ خطوط راه آهن جمهوری اسلامی ایران، محدوده ایستگاه گرگان تا ایستگاه گلوگاه با مسافت ۶۶ کیلومتر را مورد مطالعه قرار دادیم. این مسیر تک لاین بوده و هم برای جابجایی بار و هم مسافر استفاده می شود. تمرکز اصلی پژوهش بر ۴۲۹ تا ۴۴۱ کیلومتر، بین ایستگاه بندرگز تا گلوگاه به مدت ۱۰۰ دقیقه بوده و بررسی توسط قطار مسافربری از نوع تخت خوابی انجام شده است.
- از جمله محدودیت های موجود در انجام این پروژه می توان به موارد زیر اشاره کرد:
- عدم دسترسی به داده های ماشین اندازه گیر در هر لحظه.
 - عدم کنترل بر سرعت قطار در طول سفرهای انجام شده.
 - عدم کنترل بر زمان و مکان توقف قطار که البته این رخداد مشکلات بسیاری را مخصوصا در هماهنگ کردن داده ها با ابتدا و انتهای مسیر به وجود آورد.
 - داده های بایگانی اداره راه آهن و جمع آوری شده شش ماه با هم اختلاف زمانی دارند و در این مدت، شرایط هندسی ریل حتما دچار تغییراتی شده است و سبب ایجاد خطاهایی در نتایج خواهد شد.

در این پژوهش، ابتدا در بخش اول مقدمه بر موضوع این مقاله پرداخته شده و در بخش دوم پیشینه اقدامات انجام شده در این زمینه را نشان می دهد. روش های صورت گرفته در حل پژوهش در بخش سوم آورده شده است. همچنین در بخش چهارم، نتایج حاصل از حل مدل ذکر شده و مقایسه های مختلف از یافته ها صورت گرفت و در نهایت نتیجه گیری های انجام شده در بخش انتهایی بیان شده است.

۲) پیشینه تحقیق

۲-۱) جمع آوری داده های لرزش از حاشیه ریل

نمونه هایی از تحقیقات انجام شده در زمینه جمع آوری داده ها عبارتند از:

- در یک مطالعه (Rossi & Nicolini, ۲۰۰۳) مدلی برای پیش بینی لرزش های هدایت شده از قطارهای سریع السیر با ورودی هایی شامل سرعت و وزن قطار، شکل هندسی ریل، مشخصات خاک و فاصله از نقطه سنجش ریل، خطای پیش بینی کمتر از ۲.۵ دسی بل بود.
- در یک پژوهش (Bahrekazemi, ۲۰۰۴) بررسی میزان لرزش های سطح خاک اطراف ریل در چهار ایستگاه سوئد و توسعه مدلی با ورودی هایی مانند سرعت قطار، فاصله سنسورها از ریل، میزان تضعیف ارتعاشات و نیروی چرخ برای تخمین میزان لرزش ها با دقت نسبتا قابل قبول.
- در یک مقاله (Tsunashima و همکاران، ۲۰۲۳) از داده های ارتعاشی جمع آوری شده توسط گوشی های هوشمند مسافران برای پایش وضعیت مسیرهای ریلی استفاده کرده است. هدف این پژوهش ارائه یک روش کم هزینه برای بررسی پیوسته شرایط هندسی خطوط و تشخیص خرابی ها است.
- در یک تحقیق (Mohammadzadeh و همکاران، ۲۰۲۴) رابطه بین هم ترازی مسیرهای ریلی را بررسی کرده و روش های تحلیلی مبتنی بر فرکانس و الگوریتم های یادگیری ماشین را مقایسه می کند. هدف آن بهبود دقت مدل های پیش بینی برای تشخیص ناهنجاری های مسیر است.
- همچنین در مدلی (Meng و همکاران، ۲۰۲۳) به استفاده از سیستم های اینترنت اشیا (IoT) برای نظارت بر ارتعاشات و نویز در حمل و نقل ریلی با استفاده از گوشی های هوشمند می پردازد. این رویکرد به بهبود عملکرد و ایمنی سیستم های حمل و نقل کمک می کند.

۲-۲) برداشت داده ها از ریل به کمک ماشین آلات

ثبت شرایط مسیر ریلی با استفاده از ماشین آلات ریلی از مفاهیم قدیمی در مهندسی خطوط ریلی است.

- در یک پژوهش (Lee و همکاران، ۲۰۱۱)، سیستمی با اجزای نوری معرفی کردند که در خط راه آهن تاکایاما با دقت ۳.۶ میلی متر و سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت داده ها را جمع آوری می کرد.
- در مطالعه ای (MORI و همکاران، ۲۰۱۰)، سیستمی موقت برای نصب در کابین قطار ارائه داد که از GPS و نقشه مسیر ریلی استفاده می کند اما مشکلاتی مانند محدودیت عمر باتری داشت.

- در یک پژوهش (Kaito و همکاران، ۲۰۰۶) سیستمی با شتاب‌سنج سه محوره و GPS طراحی کردند که در کف قطار نصب شد.
- در یک مقاله (Heirich و همکاران، ۲۰۱۱) سیستمی ارزان‌قیمت با شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و GPS برای اندازه‌گیری هندسه خطوط ریلی طراحی کردند که درون کابین قطار نصب می‌شد.
- نکته‌ای که قابل توجه است، این است که محل قرارگیری سنسورهای درونی (IMU) بسیار مهم است و براساس پارامتری که قرار است اندازه‌گیری شود، ممکن است تغییر کند که در این راستا افرادی مثل (Lee و همکاران، ۲۰۱۱)، (Molodova و همکاران، ۲۰۱۴) و (Ackroyd و همکاران، ۲۰۰۲) با تغییر در سنسورها، تعداد و نوع شتاب‌سنج‌ها، پژوهش‌هایی طراحی کردند که از هر کدام نتایج مختلفی به دست آمده است.
- در چند دهه اخیر، چندین کارخانه به تولید ماشین‌های اندازه‌گیری خطوط ریلی پرداخته‌اند.
- EM 250 توسط شرکت Plasser & Thruer که با سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند و کاهش نیروی انسانی از مزایای آنها می‌باشد.
- EM-SAT 120 توسط شرکت Plasser & Thruer که برای تشخیص دقیق خرابی‌ها در مناطق خاص استفاده می‌شود. در ایران از این ماشین استفاده می‌شود.
- سیستم اندازه‌گیری هندسه خطوط ریلی Solid Track که توسط Andian برای بازارهای آمریکا طراحی شده و پارامترهای مختلف ریل را اندازه‌گیری و داده‌ها را با GPS همگام‌سازی می‌کنند.
- در مقاله‌ای (McAnaw، ۲۰۰۳) دو سیستم مبتنی بر شتاب، Macminder و Mactrack را توصیف کرد. Macminder کیفیت سواری قطار را اندازه‌گیری می‌کند و Mactrack شرایط هندسی ریل را با سنسورهای نصب‌شده در قطار که سیستم بازرسی ویدئویی خودکار (AVI) در متروی لندن برای نظارت بر ریل‌ها بکار می‌رود، بررسی می‌کند.
- یک پژوهش توسط (Antognoli و همکاران، ۲۰۲۰) نشان داده‌اند که در سال‌های اخیر، متروی لندن نیز سیستم UGMS را توسعه داده که بدون ایجاد اختلال در سرویس‌دهی مترو، اندازه‌گیری هندسی خطوط را انجام می‌دهد.
- قطار (NMT (New Measurment Track یا موز پرندۀ دارای ماشین کشنده TRC (Trac Recording Coaches)، ژنراتور و واگنی برای نصب سیستم‌های بازرسی شامل شتاب‌سنج‌ها و دوربین‌ها می‌باشد.
- در مطالعه‌ای (Kratowille، ۲۰۱۹) در شرکت راه‌آهن DB آلمان سیستم‌های اندازه‌گیری را روی دو واگن قطار سریع‌السیر ICE نصب کردند و از شتاب‌سنج‌ها، سنسورهای لیزری و دوربین‌ها برای اندازه‌گیری لرزش‌ها، فاصله‌ها و پیچش واگن استفاده نمودند. این سیستم پارامترهایی مانند cant، curvature، z profile و y profile gauge را اندازه‌گیری کرد.
- در پژوهشی (Bokhman و همکاران، ۲۰۱۴) نشان داده‌است که یک سیستم جدید در روسیه با استفاده از اسکنرهای لیزری و سیستم ناوبری اینرسی (SINS) زیر بوژی قطار، موقعیت ماشین را بطور لحظه‌ای مشخص و شرایط هندسی جانبی ریل را به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. این سیستم نخستین مرور بر سیستم‌های

اندازه گیری هندسه مسیر ریلی با نصب زیر بوژی است اما تنها قادر به اندازه گیری هندسه جانبی خطوط ریلی است که محدودیت محسوب می شود.

- در مطالعه دیگری (Weston و همکاران, ۲۰۰۷)، برای کاهش تعداد سنسورها و بهینه سازی مکان نصب آنها، مکان های مختلف سنسورها روی بوژی بررسی شده است و نتیجه نشان داد که نصب شتاب سنج ها روی اکسل باکس نقص های جانبی ریل با طول موج های کوتاه را اندازه گیری می کند، هر چند نصب آنها مشکل است.
 - در مقاله ای (Bababeik و همکاران, ۲۰۲۴)، در مورد یک سیستم ریلی برگشت پذیر صحبت می کند که این قابلیت را دارد که در صورت اُفت عملکرد آن در اثر سانحه، طی زمان معقولی به حالت عملکرد عادی خود بازگردد. در این مقاله روشی برای افزایش برگشت پذیری شبکه ریلی از طریق مکان یابی بهینه سازمان قطار امدادونجات به منظور بازگشایی سریع محور ریلی مسدود، ارائه شده است.
- در جدول ۱ به صورت خلاصه مروری بر پژوهش های پیشین شده است.

جدول ۱. جدول مرور ادبیات پیشین

نویسنده/سال	هدف/نوآوری	ابزارها	الگوریتم ها/تکنیک ها
Rossi & Nicolini (2003)	پیش بینی لرزش قطار سریع السیر	وزن، سرعت، هندسه ریل	مدل تحلیلی
Bahrekazemi (2004)	تخمین لرزش خاک اطراف ریل	فاصله، سرعت، تضعیف	مدل تجربی
Tsunashima et al. (2023)	پایش مسیر با موبایل	گوشی هوشمند	تحلیل سیگنال
Mohammadzadeh et al. (2024)	مقایسه الگوریتم ها	داده مسیر + فرکانس	ML، تحلیل طیفی
Meng et al. (2023)	پایش IoT	سنسورها، موبایل	زمان واقعی
Lee et al. (2011)	دقت بالا در برداشت	سیستم نوری	سنجش نوری
Mori et al. (2010)	نصب موقت GPS	GPS + نقشه	مسیریابی
Kaito et al. (2006)	تحلیل کف قطار	GPS + شتاب سنج	تحلیل شتاب
Heirich et al. (2011)	سیستم ارزان	IMU	ترکیب حسگرها
Ackroyd et al.	تاثیر محل نصب سنسور	سنسورهای مختلف	تحلیل مقایسه ای
McAnaw (2003)	پایش کیفیت سواری	Macminder/Mactrack	AVI + شتاب سنج
Antognoli et al. (2020)	UGMS بدون توقف	نصب دائم	پایش پیوسته
Kratochville (2019)	اندازه گیری دقیق ICE	شتاب + لیزر + GPS	چند حسگری
Bokhman et al. (2014)	اندازه گیری جانبی	SINS + لیزر	ناوبری اینرسی
Weston et al. (2007)	بهینه سازی مکان سنسور	نصب روی اکسل	تحلیل ارتعاشی
Bababeik et al. (2024)	افزایش برگشت پذیری	مکان یابی امداد	بهینه سازی
پژوهش حاضر ۲۰۲۵	پایش با موبایل	شتاب سنج موبایل	تحلیل لرزش

۲-۳) نوآوری پژوهش

در این پژوهش، برای اولین بار از یک سیستم مخابراتی و سیستم ثبت لرزش مانند موبایل به عنوان ابزار جمع آوری داده ها استفاده شده است. هدف این بود که با این داده ها، وضعیت هندسی ریل را تحلیل کرده و در صورت تنزل مسیر، قبل از بروز

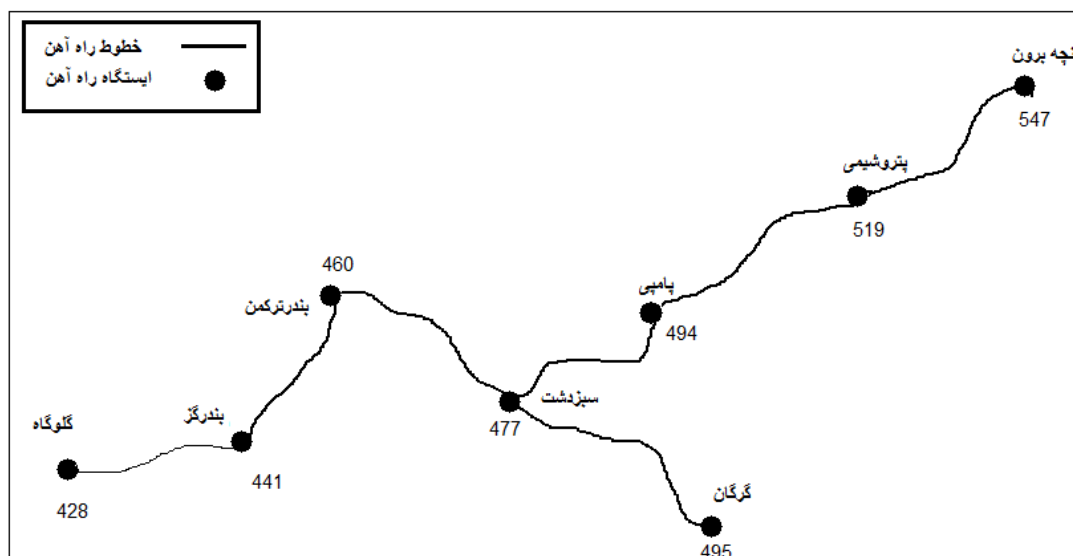
خرابی به واحد نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اطلاع دهیم تا با کمترین هزینه و تکرارپذیری بالا، شرایط هندسی ریل را پایش کرده و ضررهای شرکت‌های ریلی کاهش یابد.

(۳) روش تحقیق

افزایش جمعیت و نیاز به حمل‌ونقل ارزان، موجب رشد استفاده از سیستم حمل‌ونقل ریلی شده‌است. با افزایش سرعت قطارها که در کشورهای پیشرو به بیش از ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت رسیده‌است، مدت زمان سفر کاهش یافته اما از آن طرف افزایش تعداد مسافران و قطارها، همراه با شرایط جغرافیایی، منجر به افزایش خرابی‌ها و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی شده‌است. برای کاهش این هزینه‌ها، خطوط ریلی بازرسی می‌شوند که هدف آن شناسایی نقاط خرابی و جلوگیری از رسیدن ریل به نقطه شکست است که با پیشرفت تکنولوژی، بازرسی‌ها به سمت استفاده از دستگاه‌های تخصصی رفته‌است. این دستگاه‌ها هزینه‌های راه‌آهن را کاهش داده و مانع رسیدن ریل به نقطه شکست می‌شوند اما همچنان مشکلاتی وجود دارد:

- تکنولوژی ساخت این تجهیزات و هزینه‌های عملیات و نیروی انسانی آن گران است.
 - این تکنولوژی در بسیاری از کشورها وجود ندارد یا باید با هزینه‌های بالا خریداری شود.
 - تعداد این تجهیزات محدود است و نمی‌توانند تمام شبکه ریلی را بطور مستمر پایش کنند.
- به‌همین دلیل، پژوهشگران به دنبال پایش پیوسته خطوط ریلی هستند. ما در این پروژه می‌خواهیم با استفاده از گوشی‌های موبایل مسافران، میزان لرزش‌های درون کابین را بطور پیوسته و با تکرارپذیری بالا رصد کنیم. آنچه هدف ما را ارزشمند و متمایز با پژوهش‌های دیگر می‌کند، تاکید ما بر کاهش قابل ملاحظه هزینه با استفاده از یک سیستم موبایل است که دردسترس همگان بوده و بدون هیچ هزینه‌ای به جمع‌آوری داده‌ها و تعدد تکرارپذیری می‌پردازد.
- قابل ذکر است که در این پژوهش جامعه آماری خطوط راه‌آهن سراسر کشور می‌باشد. در زیر برای آشنایی بیشتر با شبکه‌های ریلی کشور به یکسری آمارهایی که توسط اداره راه‌آهن جمع‌آوری شده‌است و بازه زمانی آن فروردین ۱۳۹۶ تا اول اسفند ۱۳۹۶ می‌باشد، اشاره می‌کنم:

- تعداد کل مسافرن جابجا شده ۲۴,۴۸۰,۴۹۲ نفر می‌باشد.
 - میزان بار ناخالصی که در این سال حمل شده، ۵۰۹,۳۹۶,۴۹۲ تن می‌باشد.
 - میزان بار خالصی که در این سال جابجا شده، ۴۶,۷۶۵,۹۵۱ تن می‌باشد.
 - میزان بهسازی خطوط در این سال ۱۴۲ کیلومتر و بازسازی خط ۱۰۷ کیلومتر بوده‌است.
 - نزدیک به ۱۳۴۳۷ کیلومتر خط ریلی در کشور موجود است که در حال حاضر سریع‌ترین آن، خط تهران-مشهد می‌باشد که با سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت در حال سرویس دهی است.
- اما کار میدانی ما در این پژوهش در مجموعه خطوط ریلی شمال شرق انجام شده‌است که در شکل ۱ نمایش داده شده‌است. اعدادی که در زیر هر ایستگاه زده شده‌است، مربوط به عدد کیلومتر آن ایستگاه می‌باشد که نسبت به مبدا حرکت یعنی ایستگاه راه‌آهن تهران، سنجیده می‌شوند.



شکل ۱. نقشه شمال شرق

نرم افزار فایفاکس، داده های جمع آوری شده را به دو فرمت اکسل و سیگنال های سینوسی در اختیارمان قرار می دهد. به این صورت که با شروع حرکت قطار، این اپلیکیشن داده های سرعت (برابر با سرعت حرکت گوشی) و شتاب در سه راستای محور X و Y و Z را ثبت می کند. محور Z داده های لرزش واگن در راستای عمود به سطح زمین، محور Y داده های لرزش واگن را در سطح افق و محور X، میزان شتاب واگن را در راستای امتداد ریل نشان می دهد.

این اپلیکیشن از دو قسمت جدا از هم، برای ثبت داده ها استفاده می کند. در صفحه اول در هر ثانیه یک زمان و یک سرعت مربوط به آن زمان و یک مکان (GPS) مربوط به آن زمان ثبت می شود و در صفحه دوم در هر ثانیه صد زمان نوشته می شود یعنی هر ثانیه به صد قسمت تقسیم میشود و به ازای هر زمان ثبت شده سه عدد ثبت می شود که بیانگر شتاب های ثبت شده در سه راستای توضیح داده شده در بالا می باشند.

در این بخش، قابلیت اطمینان ابزار اندازه گیری، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، اپلیکیشن فایفاکس بر روی چهار دستگاه موبایل نصب شد و در یک خودروی پژو در مسیری سه کیلومتری با سرعت های متغیر آزمایش شد. این آزمایش ۱۳ بار تکرار شد و در مجموع در ۵۲ فایل اکسل، داده های سرعت و زمان ثبت شد و این تعداد فایل را در نرم افزار متلب قرار دادیم و بطور جالبی تحلیل داده ها نشان داد که زمان های ثبت شده توسط فایفاکس، تقریباً بدون خطا با تایمر همخوانی دارند و نمودارهای سرعت-زمان و شتاب-زمان، تطابق زیادی با یکدیگر دارند.

در این قسمت به همگام سازی داده های جمع آوری شده بین ایستگاه های گرگان و گلوگاه پرداخته شده است. داده ها در نرم افزار فایفاکس در دو صفحه نمایش داده می شوند: یکی سرعت در مقابل زمان و دیگری شتاب در مقابل زمان که دو مشکل اصلی در این باره وجود دارد:

۱) داده های سرعت، هر ثانیه یک بار ثبت شده اند در حالیکه داده های شتاب هر صدم ثانیه یک بار ثبت

می شوند.

۲) اختلاف زمانی کمتر از یک دقیقه بین زمان های ثبت شده برای سرعت و شتاب وجود دارد.

اما مشکل اول به کمک دستور درونیابی (interp) در نرم‌افزار متلب حل شده‌است و در حل مشکل دوم از این روش کمک گرفتیم که آخرین زمان ثبت شده برای داده‌های شتاب را به آخرین زمان ثبت شده برای داده‌های سرعت، تقسیم کردیم و این نسبت به دست آمده را در تمامی زمان‌های ثبت شده در جمع‌آوری سرعت حرکت واکن ضرب کردیم. به این ترتیب مدت زمان سفری را که صفحه اول فایفاکس نمایش می‌دهد با مدت زمان سفری را که صفحه دوم فایفاکس نشان می‌دهد، با هم برابر می‌شوند و آن میزان خطای کمتر از یک دقیقه‌ای دیگر وجود نخواهد داشت.

برای به دست آوردن مکان داده‌ها با استفاده از فرمول‌های فیزیک و دستور cumsum در نرم‌افزار متلب، داده‌های سرعت-زمان را به داده‌های مکان-زمان تبدیل کردیم تا میزان فاصله از مبدا حرکت در هر لحظه از زمان در دسترس باشد. دلیل این کار شناسایی راحت‌تر محل خرابی روی ریل و گزارش آن نقطه است.

دو دسته داده داریم؛ یکسری داده‌هایی که خودمان توسط نرم‌افزار فایفاکس جمع‌آوری کرده‌ایم و یکسری از داده‌های دیگر که توسط ماشین اندازه‌گیر راه آهن کشور یعنی EM120 برداشت شده‌اند. البته این ماشین به ازای هر ۲۵ سانتی‌متر اطلاعات جمع‌آوری می‌کند سپس در هر ۲۵ سانتی‌متر اطلاعات متفاوتی از شرایط هندسی ریل‌ها ثبت می‌کند و این در حالی است که از مجموعه اطلاعات ثبت شده توسط این ماشین اندازه‌گیری، ما تنها با داده‌های LL و AL سروکار داریم که واحد اندازه‌گیری آنها میلی‌متر بوده و نشان‌دهنده جابجایی در ریل نسبت به جایگاه طراحی شده ریل می‌باشند. هدف ما در این پروژه این است که با تحقیق در این مورد متوجه شویم که آیا یک همبستگی معناداری بین داده‌های فایفاکس و EM120 وجود دارد یا خیر؟ به عبارت دیگر می‌خواهیم تحقیق کنیم که آیا فایفاکس خرابی‌های ریل را نشان می‌دهد یا خیر؟ دقت داشته باشید مواردیکه در زیر به ترتیب توضیح داده خواهند شد، مواردی هستند که روی داده‌های خام برداشت شده از خطوط ریلی اجرا کردیم تا در نهایت به نتایج مورد نظر رسیدیم.

۳-۱) مزیت‌های روش پیشنهادی

EM120 تنها ماشین ریلی با سنسورهای زیاد است که در کشور در حال بازرسی ریل‌های شمال تا جنوب می‌باشد. از جمله معایب اصلی این ماشین سرعت بسیار پایین حرکت آن می‌باشد که بعضی از اوقات تا ۱۳ کیلومتر بر ساعت را می‌تواند بررسی کند و از جمله اشکالات آن می‌باشد. یکی دیگر از معایبی که به این روش بررسی ریلی وارد است، شناسایی دیر هنگام عیب است. یعنی این ماشین زمانی عیب ریل را شناسایی می‌کند که آن مشکل به اندازه کافی رشد کرده باشد که قابل شناسایی باشد و این باعث افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود.

این توضیحات در حالی است که سیستم مخابراتی تلفن همراه با گزارش‌هایی پیامی از شتاب انتقالی از ریل مدت زمان شناسایی را کوتاه‌تر کرده‌است و به مراتب هزینه‌های شناسایی خرابی ریل و نگهداری و تعمیرات را کاهش می‌دهد.

۳-۲) سنکروم کردن داده‌های EM120 با داده‌های فایفاکس

دستگاه EM120 داده‌های خطوط ریلی را از کیلومتر ۴۲۸ تا ۴۹۵ جمع‌آوری کرده‌است اما جهت حرکت آن با فایفاکس که از کیلومتر ۴۹۵ به ۴۲۸، داده جمع‌آوری می‌کند، مخالف است. برای حل این مشکل، داده‌های EM120 را در فایل اکسل معکوس کردیم. همچنین ایستگاه گرگان را مبدا و کیلومتر صفر و ایستگاه گلوگاه را کیلومتر ۶۷ در نظر گرفتیم.

مشکل دیگر این است که EM120، داده ها را بین کیلومتر ۴۹۵ و ۴۲۸ و فایفاکس داده ها را بین گرگان و گلوگاه جمع آوری می کند. بنابراین داده های اضافی فایفاکس را حذف کردیم تا هر دو مجموعه داده ها منطبق شوند و یک بیان مشترک از محدوده داده ها ارائه دهند. در این پژوهش، برای اولین بار از یک سیستم مخابراتی و سیستم ثبت لرزش مانند موبایل به عنوان ابزار جمع آوری داده ها استفاده کرده ایم. هدف ما این بود که با این داده ها، وضعیت هندسی ریل را تحلیل کرده و در صورت تنزل مسیر، قبل از بروز خرابی، به واحد نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اطلاع دهیم تا با کمترین هزینه و تکرارپذیری بالا، شرایط هندسی ریل را پایش کرده و ضررهای شرکت های ریلی را کاهش دهیم.

۳-۳) مسیر دقیق برای انجام کدنویسی ریاضی

برای انجام کدنویسی، از بین داده های جمع آوری شده بین ایستگاه گرگان تا ایستگاه گلوگاه، مسیر کوتاه تر بین ایستگاه بندرگز تا ایستگاه گلوگاه (تابلوهای ۴۴۱ تا ۴۲۸ به مسافت ۱۲۲۴۰ متر) انتخاب شده است. این انتخاب به دلیل کاهش زمان محاسبات و نیاز به اجرای مکرر برنامه در متلب بوده است. همچنین مشخص شد که بین ایستگاه بندر ترکمن و بندرگز داده ای توسط EM120 جمع آوری نشده است زیرا این مسیر، زیرساخت های نامناسب و قدیمی دارد و اداره کل راه آهن ترجیح داده از آن داده ای برداشت نشود.

۳-۴) دسته بندی کردن داده های جمع آوری شده

تاکنون ۱۲۲۴۰ متر داده شتاب-زمان از فایفاکس و ۱۲۲۴۰ متر داده هندسی-مکان از EM120 جمع آوری شده است. این داده ها را به دسته های شصت متری با هم پوشانی چهل متر دسته بندی کرده ایم. به این ترتیب، دسته اول شامل اطلاعات بین صفر تا شصت متر، دسته دوم بین بیست تا هشتاد متر و به همین ترتیب ادامه دارد. در نهایت داده های فایفاکس و EM120 به بیش از ششصد دسته تقسیم شده اند. برخی دسته ها مشکلات فنی مانند عدم ثبت داده داشتند که به همین دلیل دسته هایی که داده نداشتند را حذف کرده ایم. در نهایت تعداد دسته ها از ۶۱۰ به تعداد کمتری کاهش یافته است.

۳-۵) انحراف معیار داده های هندسی ریل

برای ارزیابی کیفیت هندسه خطوط ریلی، انحراف استاندارد داده های هندسی در طول ۶۰ متری محاسبه می شود. از دستور std در نرم افزار متلب برای هر دسته ۶۰ متری، انحراف معیار پارامترهای هندسی LL و AL برای ریل های راست و چپ به دست آمده است. همچنین ماکزیمم انحراف استانداردهای ریل چپ و راست نیز ثبت شده است. این داده ها در ماتریسی با ۶۱۰ سطر و ۷ ستون سازماندهی شده اند. ستون ها شامل فاصله مکانی از مبدا، انحراف معیار پارامترهای LL و AL برای ریل های راست و چپ و ماکزیمم این انحرافات هستند. هر دسته ۶۰ متری دارای ۲۴۰ داده از هر ریل برای پارامترهای LL و AL است. نماینده هر دسته ۶۰ متری دو عدد است که بیانگر شرایط هندسی عمودی و افقی ریل می باشد.

در شکل ۲، داده های جمع آوری شده و نحوه دسته بندی آنها نمایش داده شده است. داده های ستون اول، چهارم و هفتم این ماتریس در اجرای پروژه و مدل سازی ها بیشترین استفاده را دارند. سطرهای این ماتریس همان دسته های ۶۰ متری هستند که به عنوان نمونه استفاده شده اند و با ۶۱۰ دسته ۶۰ متری با هم پوشانی ۴۰ متری، ۶۱۰ نمونه در اختیار داریم.

	x	LLL	LLR	max	ALL	ALR	max
نمونه اول	1.25	0.004	0.021	0.025	0.26	0.0012	0.0004
نمونه دوم	0.0015	0.0025	0.068	0.0026	0.0125	0.0015	0.0015
	:	:	:	:	:	:	:
	:	:	:	:	:	:	:
	:	:	:	:	:	:	:
نمونه شانزدهم	1.00025	0.0125	0.0024	0.0158	0.2165	0.0005	0.0012

شکل ۲. ماتریس داده‌های دسته‌بندی شده و معرفی مولفه‌های این ماتریس

۳-۶) پیولچ (p Welch) زدن بر روی داده‌های فایفاکسی

۳-۶-۱) تبدیل فوریه

یک سیگنال از ترکیب چندین موج سینوسی با فرکانس‌های مختلف تولید می‌شود ولی تا زمانی که ما یک سیگنال را برحسب زمان در اختیار داشته باشیم، نمی‌توانیم به موج‌های سینوسی که آن سیگنال را تولید می‌کنند، پی ببریم و آن امواج را بطور دقیق بشناسیم. تبدیل فوریه این کمک را به ما می‌کند تا امواج را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تغییر دهیم و این مسئله باعث می‌شود تا تشخیص دهیم که این موج به ظاهر بهم ریخته و دارای نویزهای مختلف از چند موج اصلی یا از چند فرکانس و همچنین از چه فرکانس‌هایی و با چه قدرتی تولید شده‌اند. درحقیقت هدف از تبدیل فوریه، نشان دادن یک سیگنال به عنوان یک ترکیب خطی از سیگنال سینوسی از فرکانس‌های مختلف است. در صنعت، تبدیل فوریه ابزار قدرتمندی برای تشخیص خرابی‌ها محسوب می‌شود. در علم ارتعاشات، لرزش‌های تجهیزات صنعتی به صورت پیوسته ثبت و تحلیل می‌شوند. زمانی که فرکانس‌های غیرمعمول (غیر از فرکانس‌های شناخته شده دستگاه) شناسایی شوند، می‌توان بلافاصله به بروز یک وضعیت غیرعادی پی برد.

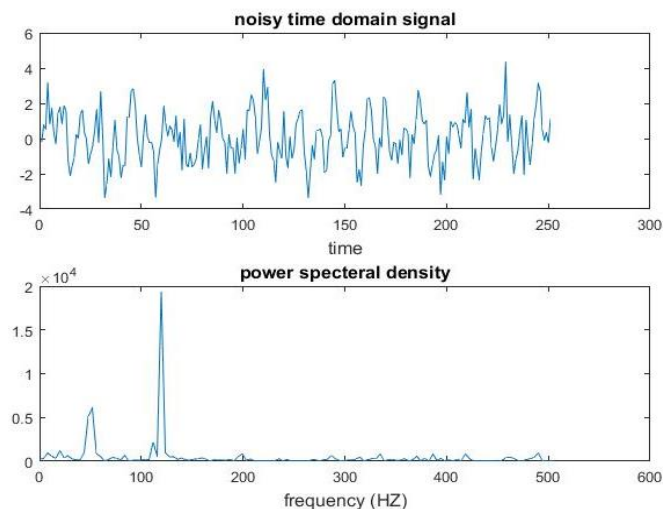
این وضعیت ممکن است ناشی از موارد زیر باشد:

- شل شدن اتصالات مکانیکی (مانند پیچ‌های گیربکس)

- ظهور نقص‌های جدید در قطعات

- شروع فرآیند خرابی در سیستم

در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)، از تحلیل سیگنال‌ها به‌ویژه تبدیل فوریه به صورت تخصصی استفاده می‌شود. این روش‌ها امکان ترجمه سیگنال‌های پیچیده و شناسایی الگوهای ناشناخته را فراهم می‌کنند که برای پیش‌بینی و جلوگیری از خرابی‌های احتمالی حیاتی هستند. برای مثال: شکل ۳ نمایش دهنده یک موج می‌باشد که از دو موج سینوسی با فرکانس‌های ۵۰ و ۱۲۰ به همراه بخشی از نویزها در طول زمان تولید شده‌اند که از این نمودار هیچ‌یک از این اطلاعات قابل برداشت نیست ولی به کمک تبدیل فوریه این مسئله به روشنی هرچه بیشتر در نمودار دوم خودش را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. انتقال داده از حوزه زمان به حوزه فرکانس

همانطور که در شکل بالا مشاهده می کنید، نمودار اول که بیانگر موج اصلی است و محور طول های آن زمان است، هیچ اطلاعات خاصی را در اختیارمان قرار نمی دهد و تقریباً هیچ برداشت مثبتی از آن نداریم. ولی به کمک دستور تبدیل فوریه یک سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تغییر می دهیم. با این روش به راحتی می توان شناسایی کرد که در یک سیگنال چه طول موج هایی با چه فرکانس هایی وجود دارند. نمودار بالا نشان می دهد فرکانس اصلی از دو موج سینوسی با فرکانس های ۵۰ و ۱۲۰ تولید شده است و این موضوع به کمک تبدیل فوریه کشف شد و سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل کرده است.

۳-۶-۲) پیولچ (pwelch) زدن بر روی داده های فایفکس

در این پژوهش، به جای تبدیل فوریه، از تابع دیگری استفاده می کنیم که پایه و اساس آن مبتنی بر تبدیل فوریه است یعنی تبدیل پیولچ (PWELCH). در واقع، این تابع از همان مبانی علمی تبدیل فوریه بهره می برد. هر دسته از نمونه های جمع آوری شده (که به آن نمونه ها اشاره می کنیم) شامل تعدادی پارامتر زمان و شتاب هستند. پس از اعمال عملیات پیولچ بر روی این داده ها، یک ماتریس سطری با ۱۰۱ ستون به دست می آید. در حقیقت با این عملیات، قدرت فرکانس های سازنده سیگنال های لرزش را در ۱۰۱ بعد شناسایی می کنیم.

هر دسته از نمونه های جمع آوری شده (که به آن نمونه ها اشاره می کنیم) شامل پارامترهای زمان و شتاب است. پس از اعمال تبدیل پیولچ (PWELCH) بر روی این داده ها، یک ماتریس سطری با ۱۰۱ ستون حاصل می شود. در این مقاله، به جای تبدیل فوریه، از این تابع استفاده می کنیم.

۳-۷) گردآوری همه داده ها در یک ماتریس نهایی

این پژوهش با چهار بار تکرار سفر انجام شده است. بنابراین برای هر بخش 60 متری، چهار تکرار وجود دارد. مسیر مورد مطالعه به ۶۰۵ بخش ۶۰ متری با هم پوشانی ۴۰ متری تقسیم شده است.

در نهایت، دو ماتریس اصلی حاصل می شود:

- ماتریس داده های عمودی

- ماتریس داده‌های افقی
- ابعاد هر ماتریس ۶۰۵ سطر (مطابق با تعداد بخش‌ها) و ۴۰۵ ستون است که شامل:
- مقادیر انحراف معیار
- ماکزیمم انحراف معیارها
- 101 عنصر حاصل از تبدیل پیولج برای هر بخش ۶۰ متری می‌باشد.

۳-۸) کاهش بُعد ماتریس به کمک دستور تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)

در عملیات داده‌کاوی، بسیاری از ویژگی‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تعریف داده‌ها ندارند. با تشخیص و نادیده گرفتن این ویژگی‌ها، ویژگی‌های داده‌ها کاهش می‌یابد که در تجزیه و تحلیل داده‌ها مفید است. PCA (تحلیل مولفه‌های اصلی) باعث کاهش بعد داده‌ها شده و تنها ویژگی‌های اصلی با تغییرات زیاد استخراج می‌شود. اجرای PCA بر روی ماتریس داده‌ها، ماتریس بردارهای ویژه‌ای تولید می‌کند که هر ستون آن یک بردار را نشان می‌دهد. اولین ستون مهمترین راستایی با بالاترین تغییرات داده و ستون‌های بعدی اهمیت کمتری دارند. با ضرب داده‌ها در m بردار اول، بعد داده‌های اولیه به m کاهش می‌یابد. PCA ابعاد را مطلقاً حذف نمی‌کند بلکه ترکیب خطی از چند بعد را معرفی کند. بطوریکه یک بعد ترکیبی وزنی از ابعاد دیگر باشد.

۳-۹) روش انجام تحلیل مولفه‌های اصلی روی داده‌های این پروژه

داده‌های هر سفر بعد از عملیات پیولج به ماتریسی با ۶۰۵ سطر و ۱۰۱ ستون تبدیل می‌شوند که هر ستون یک بعد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هریک از نمونه‌ها در هریک از ابعاد، چهار بار انجام شده‌است یعنی از هر نمونه در هر بعد چهار تکرار وجود دارد که الگوریتم PCA روی این چهار تکرار انجام خواهد شد. سپس هر ستون ماتریس داده‌ها را در ستون اول ماتریس بردارهای ویژه ضرب می‌کنیم که ترکیبی از بردارهای اولیه را ایجاد می‌کند. این فرآیند برای همه ۱۰۱ بعد انجام می‌شود و به یک ماتریس جدید با ۶۰۵ سطر و ۱۰۱ ستون می‌رسیم که تعداد داده‌ها و ابعاد آن به یک چهارم کاهش یافته‌است، بدون اینکه اطلاعات مفید از دست برود.

۳-۱۰) ماتریس حاصل بعد از عملیات تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)

بعد از عملیات کاهش بُعد (PCA)، برای هر دو ماتریس راستای افقی و عمودی، دو ماتریس با ابعاد ۶۰۵×۱۰۱ به دست می‌آوریم که هر سطر یک نمونه ۶۰ متری با هم‌پوشانی ۴۰ متر است. سپس به هر سطر، سه ستون دیگر شامل انحراف استاندارد ریل چپ، ریل راست و ماکزیمم آنها اضافه می‌شود. در نتیجه هر ماتریس نهایی دارای ۶۰۵ سطر و ۱۰۴ ستون خواهد بود.

۳-۱۱) نحوه انجام کار برای مدل‌سازی

برای مدل‌سازی، نیاز است پرسیم آیا می‌توان مدلی ارائه کرد که انحراف معیارها را در دو راستای عمودی و افقی ریل تعریف کند؟ آیا می‌توان تابعی تعریف کرد که داده‌های موجود در ۱۰۱ بعد را از ماتریس داده‌ها دریافت کرده و انحراف معیارها را پیش‌بینی کند؟ در صورت یافتن این تابع، می‌توانیم بگوییم رابطه همبستگی بین داده‌های فایفاکس و ماشین اندازه‌گیر خطوط ریلی را کشف کرده‌ایم. برای این عملیات از تابع `plsregress` در سرفصل یادگیری ماشین نرم‌افزار متلب استفاده می‌کنیم.

۳-۱۲) تابع plsregress

دستور plsregress برای رگرسیون و مدل سازی بین دو گروه داده استفاده می شود و دو پارامتر ورودی می گیرد: یک ماتریس داده برای پیش بینی رفتار داده های ثانویه و یک ماتریس ستونی برای پیش بینی رفتار آن. در این پروژه، داده های ۱۰۱ بعدی فایفاکس برای پیش بینی انحراف استاندارد ریل چپ و راست استفاده می شوند. خروجی تابع plsregress شامل ماتریس β (ضرایب مدل چند جمله ای) و ماتریس $pctvar$ (میزان برازندگی ضرایب مدل) است. ماتریس $pctvar$ نشان می دهد هر یک از ضرایب β چه درصدی از پراکندگی داده ها را توضیح می دهند و تاثیر آنها در طراحی مدل چقدر است.

۳-۱۳) استفاده از تابع dividrand برای یادگیری ماشین

در یادگیری ماشین، ۶۰ تا ۷۰ درصد داده ها بطور تصادفی برای آموزش مدل و ۳۰ تا ۴۰ درصد برای تست مدل استفاده می شوند. داده های آموزش برای مدل سازی و داده های تست برای ارزیابی مدل بکار می روند. در این پروژه، با تابع dividrand در متلب، ۶۰ درصد داده ها بطور تصادفی انتخاب و به تابع plsregress داده شدند. ماتریس داده ها شامل ۶۰۵ نمونه است که ۳۶۳ نمونه برای آموزش و ۲۴۲ نمونه برای تست مدل اختصاص یافتند.

۳-۱۴) داده های پیش بینی و محاسبه میزان خطای پیش بینی

با ضرب کردن ماتریس داده های آموزش (101×363) در ماتریس β (1×101) ، ماتریسی با ابعاد 1×363 به دست می آید که پیش بینی ماکزیم انحراف استاندارد ریل چپ و راست برای داده های آموزش است. ضرب ماتریس داده های تست در β نیز پیش بینی مشابهی برای داده های تست ارائه می دهد. تفریق مقدار واقعی انحراف استاندارد از مقدار پیش بینی شده، میزان خطا را نشان می دهد. تقسیم مجموع قدر مطلق این خطاها بر مجموع انحراف استانداردهای واقعی، درصد خطای پیش بینی را نشان می دهد.

$$Error = \frac{\sum |S_i - \hat{S}_i|}{\sum S_i}$$

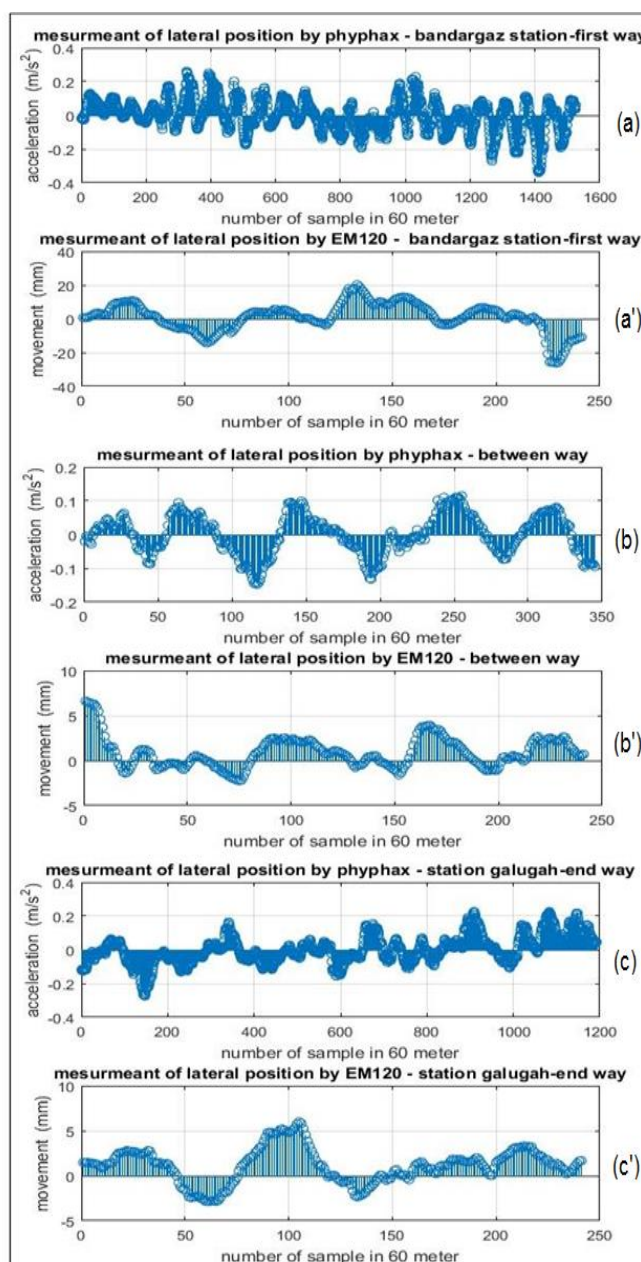
۳-۱۵) محاسبه میزان همبستگی بین داده های واقعی و پیش بینی

در بحث آماری ممکن است اندازه خطا زیاد باشد ولی داده های پیش بینی در مقیاسی بسیار کوچکتر و یا بزرگتر از داده های واقعی بتوانند داده های واقعی را به درستی هر چه بیشتر پیش بینی کنند. برای مثال: تصور کنید در یک آزمایش ۲، ۵ و ۳ داده های واقعی باشند و داده های پیش بینی آن ۰ و ۰/۳ و ۰/۱ باشند. در اینجا ۹۶ درصد خطا نشان داده شده است ولی این در حالی است که داده های پیش بینی بطور کامل و دقیق در حال توصیف رفتار داده های واقعی هستند، علیرغم اینکه میزان خطا چیز دیگری را نشان می دهد. به همین دلیل در علم آمار در اینگونه مواقع از تابع دیگری به نام همبستگی برای ارزیابی دو گروه از داده ها استفاده می شود.

۴) یافته ها

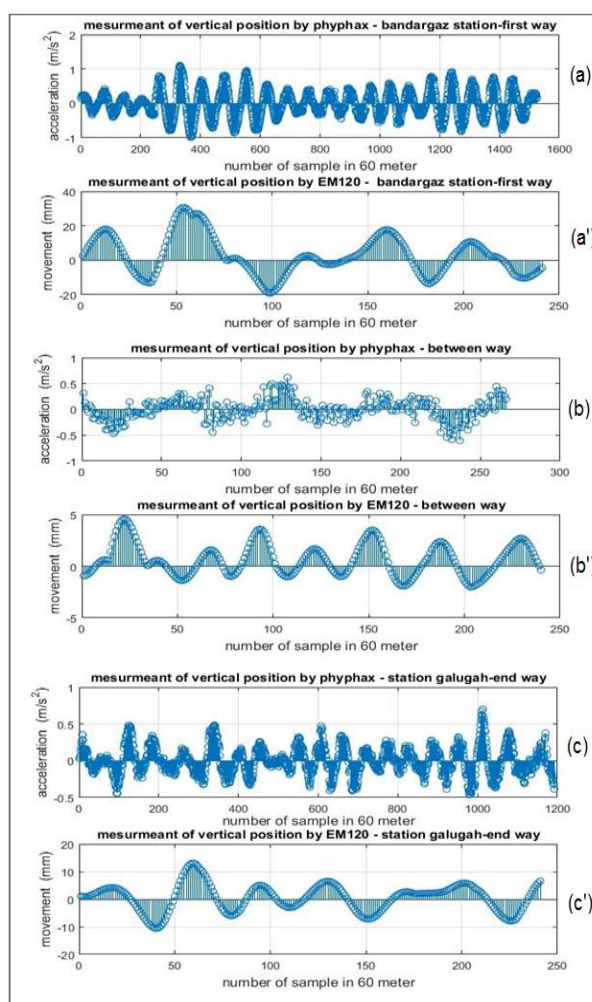
یک مطلب مانند یک قضیه در بین واحدهای نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی پذیرفته شده است مبنی بر اینکه در نزدیکی ایستگاه ها و نقاطی که قطارها در آن محل ها باید ترمز کنند، ریل دارای افت کیفیت محسوسی می باشد. حال این سؤال مطرح می شود که آیا به کمک نرم افزار فایفاکس می توانیم این جمله که در محل های توقف عمومی قطارها شرایط هندسی

ریل نامناسب‌تر از نقاط دیگر ریل است را ثابت کنیم؟ در شکل ۳ و ۴ بخش a و a' به ترتیب بیانگر شرایط خطوط ریلی در راستای افقی می‌باشند که اولی داده‌های برداشت شده توسط فایفاکس و دومی داده‌های جمع‌آوری شده توسط EM120 می‌باشند. در ابتدای مسیر، داده‌های EM120 انحراف استانداردهای ۲۰ و ۳۰ را ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب ریلی است چراکه انحراف استانداردهای ۸ تا ۱۰ شرایط بحرانی محسوب می‌شوند. همچنین داده‌های شتاب واگن فایفاکس نیز مقادیر بالای ۰.۳ و ۰.۴ را نشان می‌دهند. در بخش میانی مسیر (b و b')، ماشین EM120 انحراف استانداردهای کمتر از ۷ و فایفاکس مقادیر شتاب کمتر از ۰.۱۵ را ثبت کرده‌است. در بخش انتهایی مسیر (c و c')، هر دو سیستم مقادیر غیرمنطقی را نشان می‌دهند که بیانگر وضعیت نامناسب هندسی ریل است.



شکل ۴. برداشت داده در راستای افقی توسط فایفاکس و EM120 در ابتدا و میانه و انتهای مسیر

در بخش های a و a' داده های جمع آوری شده توسط فایفاکس و EM120 برای ۶۰ متر از مسیر ریلی نزدیک ایستگاه بندرگز نشان می دهد که داده های ثبت شده، بسیار نامناسب تر از بخش b و b' هستند. در بخش a و a' ، فایفاکس شتاب هایی با بزرگی ۱ و EM120 داده هایی با بزرگی ۳۰ را ثبت کرده است و این وضعیت در انتهای مسیر (بخش های c و c') نیز مشاهده می شود. اما در میانه مسیر (بخش های b و b')، فایفاکس شتاب هایی با بزرگی کمتر از ۰.۵ و EM120 داده هایی با بزرگی کمتر از ۵ را ثبت کرده است. این نتایج نشان می دهد که در نقاطی از ریل که قطارها بطور مکرر ترمز می کنند و توقف دارند، شرایط ریل به مراتب نامساعدتر از سایر نقاط است. همچنین با وجود کاهش سرعت قطار در ابتدا و انتهای مسیر، سیستم فایفاکس همچنان قادر به تشخیص کیفیت پایین ریل است. اگر قطار با سرعت عادی از نزدیکی ایستگاه بندرگز عبور کند، داده های شتاب بزرگتری ثبت خواهد شد که نشان دهنده افت کیفیت بیشتر ریل است. باید توجه داشت که EM120 در تمام طول برداشت داده با سرعت ثابت حرکت می کند.



شکل ۵. داده ها در راستای عمودی توسط فایفاکس و EM120 در ۶۰ متر ابتدا و میانه و انتهای مسیر

۴-۱) نتایج حاصل از تابع plsregress در راستای عمود

در یادگیری ماشین برای مدل سازی، ابتدا ۷۰ درصد داده های ورودی بطور تصادفی به عنوان داده های آموزش انتخاب

می‌شوند و مدل با استفاده از آنها ساخته می‌شود. سپس مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های تست، ارزیابی می‌شود. در این پروژه با استفاده از تابع `dividrand` در متلب، ۷۰ درصد داده‌های جمع‌آوری شده توسط فایفاکس بعد از عملیات `pwelch` برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. با تابع `plsregress`، مدلی بین دو گروه از داده‌ها طراحی شده‌است. هدف این پروژه مدل‌سازی ماکزیمم انحراف استاندارد LLL و LLR براساس داده‌های فایفاکس است. تابع `plsregress` علاوه بر ارائه ضرایب مدل، میزان تاثیرگذاری هر ضریب در مدل‌سازی را با نام `pctvar` نمایش می‌دهد. البته با استفاده از داده‌های ثبت‌شده توسط فایفاکس، نتوانستیم مدلی ساده برای پیش‌بینی انحراف استاندارد داده‌ها طراحی کنیم. دلیل این موضوع هم قادرنبودن فایفاکس به کشف مشکلات در نقاط با کیفیت ریل کمتر است.

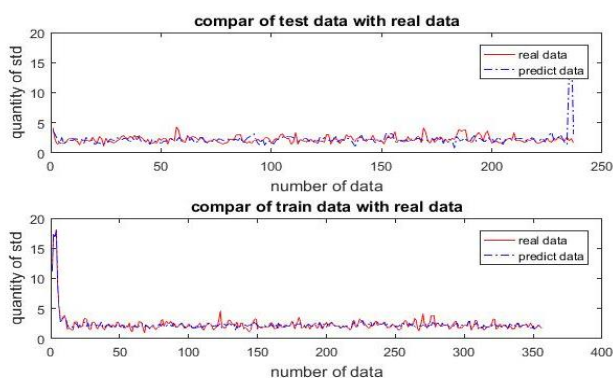
۲-۴) نتایج حاصل از تابع `plsregress` در راستای افقی

برخلاف نتایج به‌دست‌آمده در راستای عمود، نتایج به‌دست‌آمده در راستای افقی از نظر آماری معنادارتر شده‌است. در نمودارهای به‌دست‌آمده، مشاهده شده‌است که تنها با ۲۰ ضریب می‌توان مدلی طراحی کرد که تا ۹۰ درصد پراکندگی انحراف استاندارد داده‌ها را تعریف کند. این نشان می‌دهد مدلی با تعداد ضرایب کمتر و کارایی بیشتر به‌دست آورده‌ایم. در زیر مدل ریاضی برای پیش‌بینی ماکزیمم انحراف استانداردهای ریل چپ و راست، در اندازه‌گیری پارامتر `AL` که تحت عنوان شرایط هندسی در راستای افقی شناخته می‌شده‌است، نمایش گردیده‌است.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{20} \beta_i * x_i = 2.0639x_1 - 1138.2x_2 + 1888.2x_3 + \dots - 15912x_{20}$$

۳-۴) مقایسه مقادیر پیش‌بینی و مقادیر واقعی انحراف استاندارد پارامترهای هندسی `AL` و `LL`

پس از انجام مدل‌سازی با استفاده از داده‌های آموزش و تابع `plsregress` و به‌دست‌آوردن ضرایب مدل (`betta`)، ماتریس داده‌های جمع‌آوری شده توسط گوشه، پیش‌پردازش و عملیات `pwelch` روی آنها اعمال می‌شود. سپس داده‌های تربیت‌شده، بطور تصادفی جدا شده و در ماتریس `betta` ضرب می‌شوند تا مقادیر پیش‌بینی به‌دست آیند. این عملیات برای داده‌های آموزش و داده‌های تست انجام می‌شود و برای داده‌های جمع‌آوری شده در راستای عمودی و افقی اجرا می‌گردد. مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی در هر راستا نیز نمایش داده شده‌اند.



شکل ۶. مقایسه انحراف استاندارد واقعی داده‌های برداشت‌شده با `EM120` و مقادیر پیش‌بینی آن در راستای افقی

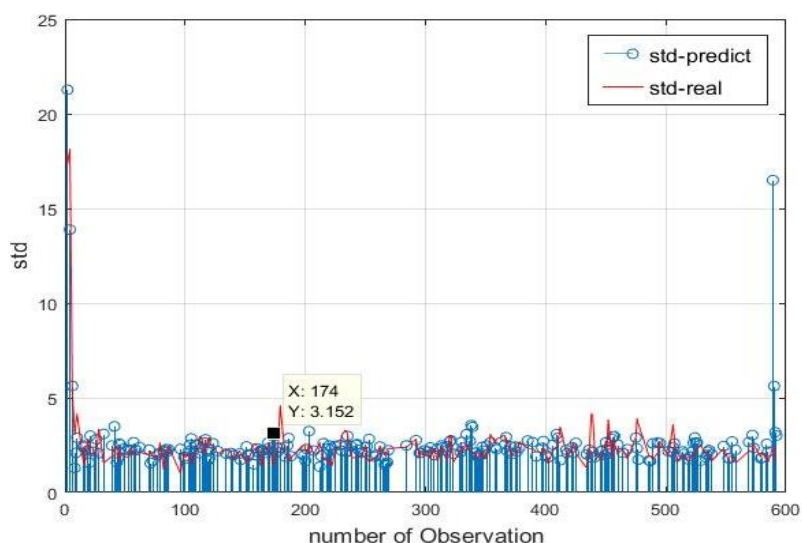
۴-۴) نتایج حاصل از تابع plsregress در راستای عمود

در شکل ۷ میزان درصد خطا و همبستگی بین داده های واقعی و پیش بینی برای داده های آموزش و تست در راستای عمودی (LL) مشاهده می شود. مدل ساخته شده برای افزایش اطمینان بیش از ۳۰ بار اجرا شده و میانگین درصد خطا و همبستگی گزارش شده اند. بطور میانگین، درصد خطا برای داده های تست حدود ۲۰ درصد و همبستگی برای داده های تست حدود ۷۰ درصد است. میانگین همبستگی در ۳۰ اجرا نیز ۶۲ درصد است که طبق آزمون t_{student} معنادار است.

	train_data_corr	test_data_corr	percent_train_error	percent_test_error
run1	0.91794	0.83785	14.89	22.61
run2	0.91264	0.86948	14.911	20.256
run3	0.93949	0.52101	14.388	28.895
run4	0.58081	0.54706	13.704	28.426
run5	0.96108	0.032689	13.875	26.376
run6	0.95075	0.59598	15.109	24.738
run7	0.94475	0.79187	14.437	21.827
run8	0.93439	0.77648	14.521	23.881
run9	0.9088	0.90794	15.373	19.967
run10	0.94135	0.68419	13.708	26.023
run11	0.91982	0.56748	14.211	29.049
run12	0.9064	0.39571	15.094	27.061
run13	0.91249	0.56255	15.26	27.24
run14	0.95974	0.41362	13.776	23.459
run15	0.94929	0.54913	13.857	25.833
run16	0.94038	0.72799	14.408	24.519
run17	0.92866	0.88657	13.655	21.774
run18	0.94322	0.72815	13.79	25.178
run19	0.95523	0.30357	14.089	26.83
run20	0.95656	0.52431	14.306	21.751
mean_runs	0.9332	0.621	14.308	21.754

شکل ۷. مقادیر مختلف همبستگی و درصد خطا درمورد پارامتر هندسی راستای افقی

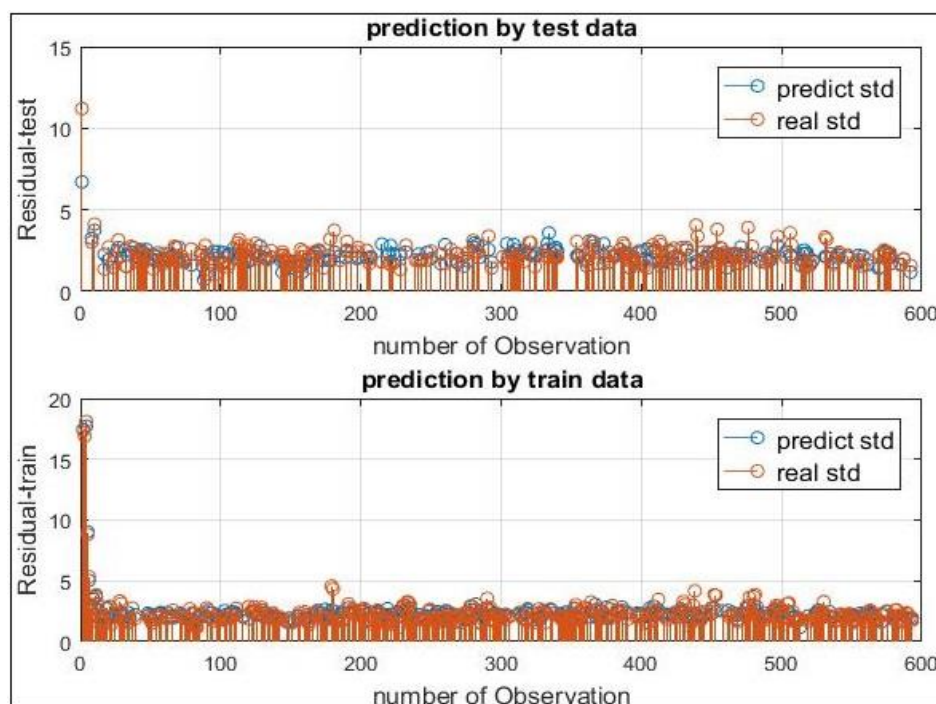
همچنین در شکل ۸، مقادیر انحراف استاندارد واقعی و پیش بینی شده برای دسته های ۶۰ متری ریل را مشاهده می کنیم. هدف شناسایی بخش های مشکوک ریل و اعزام گروه نگهداری و تعمیرات را برای بازرسی است. میانگین انحراف استاندارد پیش بینی شده ۲.۵ است و مقادیر بالاتر از این میانگین، نشان دهنده بخش های مشکوک ریل هستند.



شکل ۸. مقادیر انحراف استاندارد پیش بینی و واقعی برای داده های تست

۴-۵) محاسبه مقادیر خطا و همبستگی برای داده‌های واقعی و پیش‌بینی پارامتر هندسی AL

تمامی فرآیندهای توضیح داده‌شده در بخش ۴ و ۵ را درمورد راستای افقی نیز انجام داده‌ایم و به نمودارها و نتایج زیر، دست پیدا کرده‌ایم. شاید بتوان گفت که ماحصل این پروژه در شکل ۹ نشان داده شده‌است:



شکل ۹. نمودار میله‌ای مقادیر پیش‌بینی و واقعی انحراف استاندارد داده‌های تست و آموزش

۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش به بررسی رویکردی جدید برای برنامه‌ریزی، نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری ثبت‌شده توسط تلفن‌های همراه مسافران پرداخته‌است. هدف این تحقیق کاهش هزینه‌های مربوط به بازرسی و تعمیرات خطوط ریلی با استفاده از یک روش کم‌هزینه و با قابلیت اطمینان بالا بوده‌است. با تحلیل لرزش‌های ثبت‌شده در راستای عمودی و افقی توسط تلفن‌های همراه، نقاطی که نیاز به تعمیرات دارند بطور دقیق شناسایی می‌شوند. این روش نه تنها هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش می‌دهد بلکه به افزایش ایمنی و کیفیت مسیرهای ریلی کمک می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از تلفن‌های همراه می‌تواند بطور موثری در شناسایی نقاط آسیب‌دیده خطوط ریلی کمک کند. با تحلیل این داده‌ها، بخش‌های مشکوک ریل به‌خوبی شناسایی و تیم‌های تعمیرات به این نقاط اعزام می‌شوند. همچنین این روش با کاهش نیاز به بازرسی‌های مکرر و پرهزینه، بهبود قابل توجهی در کارایی و اقتصاد نگهداری خطوط ریلی ایجاد می‌کند. بنابراین این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل نوآورانه در مدیریت نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود ایمنی و کاهش هزینه‌ها منجر شود.

پیشنهاد می شود در مطالعات آتی الگوریتم های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای بهبود دقت شناسایی نقاط آسیب دیده خطوط ریلی براساس داده های لرزه نگاری استفاده شود. همچنین بررسی عواملی مانند شرایط آب و هوایی، نوع زیرساخت ریلی و میزان ترافیک قطارها می تواند به بهینه سازی تحلیل داده های لرزه نگاری کمک کند.

منابع

- Ackroyd, P., Angelo, S., & Stevens, J. (2002). Remote ride quality monitoring of Acela train set performance. ASME/IEEE Joint Railroad Conference, 171–178. <https://doi.org/10.1109/RRCON.2002.1000109>
- Andian Technologies, www.andian.com. 2014.
- Antognoli, M., Marinacci, C., Ricci, S., & Rizzetto, L. (2020). Requirement specifications for track measuring and monitoring systems. *Ingegneria Ferroviaria*, 2020, 841–864.
- Bababeik, M., Behnia, K., & Khademi, N. (2024). Increasing the Resilience of Rail Network through the Optimal Location of Relief Trains. *Journal of Transportation Research*, 21(2), 217–232. https://www.trijournal.ir/article_96254.html
- Bahrekazemi, M. (2004). Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction.
- Bokhman, E. D., Boronachin, A. M., Filatov, Yu. V., Larionov, D. Yu., Podgornaya, L. N., Shalymov, R. V., & Zuzev, G. N. (2014). Optical-inertial system for railway track diagnostics. 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), 1–17. <https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2014.7049477>
- Heirich, O., Lehner, A., Robertson, P., & Strang, T. (2011). Measurement and analysis of train motion and railway track characteristics with inertial sensors. 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1995–2000. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6082908>
- Islamic Republic of Iran Railways website.
- Kaito, K., Ishii, H., Fujino, Y., & Mizuno, Y. (2006). The Study of Train Intelligent Monitoring System Using Acceleration of Ordinary Train. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54676958>
- Kratochwill, R. (2019, Aug) ICE-S Vehicle reaction measurement and track geometry measurement on the same measuring train Results of the comparison of the two different track inspection methods.
- Lee, J. S., Choi, S., Kim, S. S., Kim, Y. G., Kim, S. W., & Park, C. (2011). Track condition monitoring by in-service trains: A comparison between axle-box and bogie accelerometers. IET Conference Publications, 2011(581 CP). <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0586>
- McAnaw, H. E. (2003). The system that measures the system. NDT & E International, 36(3), 169–179. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00055-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00055-5)
- Molodova, M., Li, Z., Nunez, A., & Dollevoet, R. (2014). Automatic detection of squats in railway infrastructure. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15(5), 1980–1990. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2307955>
- MORI, H., TSUNASHIMA, H., KOJIMA, T., MATSUMOTO, A., & MIZUMA, T. (2010). Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 3(1), 154–165. <https://doi.org/10.1299/jmtl.3.154>
- Rossi, F., & Nicolini, A. (2003). A simple model to predict train-induced vibration: theoretical formulation and experimental validation. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(3), 305–322. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00005-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00005-2)
- Weston, P. F., Ling, C. S., Roberts, C., Goodman, C. J., Li, P., & Goodall, R. M. (2007). Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 75–88. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT65>
- Tsunashima, H., Honda, R., & Matsumoto, A. (2023). Track Condition Monitoring Based on In-Service Train Vibration Data Using Smartphones. In *Railway Infrastructure Maintenance* (pp. 1–20). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.108123>
- Mohammadzadeh, S., Heydari, H., Karimi, M., & Mosleh, A. (2024). Correlation Analysis of Railway Track Alignment and Ballast Stiffness: Comparing Frequency-Based and Machine Learning Algorithms. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 11(1), 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100234>
- Meng, Q., Lu, P., & Zhu, S. (2023). A Smartphone-Enabled IoT System for Vibration and Noise Monitoring of Rail Transit. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(7), 5678–5687. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3233051>

پیوست

کدهای پژوهش به شرح زیر است:

/.tabdil dadehhay TGC be vahedhay 200 metry.

/.200metr aval dadehhay TGC ra joda mikonim.

clearvars

```

close all
clc
location1=xlsread('location1.xlsx');
location2=xlsread('location2.xlsx');
location3=xlsread('location3.xlsx');
location4=xlsread('location4.xlsx');
accelerometer1=xlsread('accelerometer1.xlsx');
accelerometer2=xlsread('accelerometer2.xlsx');
accelerometer3=xlsread('accelerometer3.xlsx');
accelerometer4=xlsread('accelerometer4.xlsx');
bandargazgalugah=xlsread('bandargazgalugah.xlsx');

mat.x[]=;
s(1).x=accelerometer1;
s(1).y=location1;
s(2).x=accelerometer2;
s(2).y=location2;
s(3).x=accelerometer3;
s(3).y=location3;
s(4).x=accelerometer4;
s(4).y=location4;
num_travel=4;
window_notcover=12240\50;
for p=1:num_travel

    accelerometer=s(p).x;
    location=s(p).y;

a5=zeros(floor(window_notcover),1);
strast=zeros(floor(window_notcover),1);
stchap=zeros(floor(window_notcover),1);
l=zeros(floor(window_notcover),1);

a1=bandargazgalugah(1:16,:);
a2=a1(1,:);
a3=length(a2);
dd=zeros(a3,1);
dd(1)=0;
for j=1:a3-1
    dd(j+1)=a2(j)-a2(j+1);
end
masafat=1000*cumsum(dd);
%for k=1:61
%    a4=find(masafat>=50*k & masafat<=51*k);
%    a5(k)=min(a4);
%    a6=[masafat,a1];
%    if k==1
%        a7=a6(1:a5(k),:);
%    end
%    if k~=1
%        a7=a6(a5(k-1):a5(k),:);
%    end
%    stchap(k)=std(a7(:,4));           % STD az rail samt chap
%    strast(k)=std(a7(:,5));           % STD az rail samt rast
%    l(k)=50*k;
%    akhar=[l,stchap,strast,(strast+stchap)/2];    % [ 200*k,STD chap,STD rast,STD miyanguin ]
% end
% subplot(411)
% plot(akhar(1:end-1,1),akhar(1:end-1,2));
% title 'STD curve LLL'; xlabel 'masafat per 200 meter'; ylabel 'STD' ; % rasm nemodar STD baray har 200 metr az TGC
% subplot(412)
% plot(akhar(1:end-1,1),akhar(1:end-1,3));
% title 'STD curve LLR'; xlabel 'masafat per 200 meter'; ylabel 'STD' ; % rasm nemodar STD baray har 200 metr az TGC

% joda kardan vahedhaye 35m az dadehaye TGC va eijad hamposhani dar dadeha
if p==1
cover.x[]=;

```

```

window_cover=floor(35/12240);
ebteda1=zeros(1,window_cover);
enteha1=zeros(1,window_cover);
leng_notcover=50;
leng_cover=35;
for l=1:window_cover
    %if l==1
    %ebteda1=find(masafat>=0,1);
    %enteha1=find(masafat>=200,1);
    %end
    %if l~=1
    ebteda1=find(masafat>=leng_cover*(l-1) & masafat<=leng_cover*(l-1)+5);      % 10-210/20-220/30-230...
    ebteda1=min(ebteda1);
    enteha1=find(masafat>=leng_notcover+leng_cover*(l-1) & masafat<=leng_notcover+leng_cover*(l-1)+5);
    enteha1=min(enteha1);
    %end
    cover(l).x=bandargazgalugah(ebteda1:enteha1,:);
    stdcoverchap(l)=std(cover(l).x(:,3));      %STD az dadehhaye hamposhani shode az rail chap
    stdcoverrast(l)=std(cover(l).x(:,4));      %STD az dadehhaye hamposhani shode az rail rast
%    subplot(413);
%    plot(stdcoverchap)
%    subplot(412);
%    plot(stdcoverrast)

end
stdakharcover=zeros(floor(window_cover),3);
for y=1:floor(window_cover)
    stdakharcover(y,:)=[stdcoverchap(y),stdcoverrast(y),(stdcoverchap(y)+stdcoverrast(y))/2];
end
end
accelerometer(:,4)=accelerometer(:,4)-movmean(accelerometer(:,4),20);
fraction=accelerometer(end,1)/location(end,1); % mohasebeh nesbat zaman location va accelerometer.
new=fraction*location(:,1);      % tabdil zaman location be accelerometer.
location=[new,location(:,2:end)]; % location jadid ba zaman taggir kardeh.
%location=location(4758:5412,:); % joda kardan dadehhay bandargaz ta galugah@@@@@@@@@.
time=location(:,1);      % zaman.
v=location(:,5);      % speed.
n=numel(time);
x=zeros(n,1);      % masafat tey shodeh bein har 2 zaman motevali.
x(1)=0;
for i=1:n-1
    deltat=time(i+1)-time(i);
    averagev=(v(i+1)+v(i))/2;
    x(i+1)=(deltat)*(averagev);
end
xx=cumsum(x);      % vahed meter masafat

%xxx=xx/1000;      % vahed kilo meter masafat
finish=[time,v,x,xx]; % [zaman, speed ,x ,meter]
gaz=find(finish(:,4)>44000 & finish(:,2)==0); % km start az bandargaz
gaz=min(gaz);
qi=finish(end,4)-135;
qqi=find(finish(:,4)>qi & finish(:,4)<qi+15 , 1); % km finish in tabloye glugah 429km
finishgaz=finish(gaz:qqi,:);
ff=(finishgaz(end,end)-finishgaz(1,end));
nesbat=12240/ff; %sankrom kardan masafat phyphox va TGC dar km tey shode 12.240km
finishgaz=[ finishgaz(:,1:3) , nesbat*finishgaz(:,4)];
% joda kardan vahedhaye 200m az dadehaye accelerometer phyphox bandargaz-galugah
% ebteda=floor(finishgaz(1,4));
% tim1=finishgaz(1,:)
% vahed.x[]=;
% vahed.y[]=;
% aa5=zeros(62,1);
% dera2=zeros(62,1);
% tim1=finishgaz(1,:);
% en=zeros(100,:);
% av=zeros(100,:);
% for kk=1:61
%
%    av(kk)=(ebteda + 200*kk);

```

```

% en(kk)=(ebteda + 230*kk);
% gazi=find(finishgaz(:,4)>=av(kk) & finishgaz(:,4)<=en(kk));
% aa5(kk)=min(gazi);
% tim2=tim1(aa5(kk));
% dera1=find(accelerometer(:,1)>=tim2 & accelerometer(:,1)<=tim2+0.02 );
% dera2(kk)=min(dera1);
% if kk==1
%     zamebtaccgaz=finishgaz(1,1);
%     zamebtaccgaz1=find(accelerometer>=finishgaz(1,1) & ...
%         accelerometer<=finishgaz(1,1) + 0.1 );
%     zamebtaccgaz2=min(zamebtaccgaz1);
%     vahed(kk).x=accelerometer(zamebtaccgaz2:dera2(kk),:);
% end
%
% if kk~=1
%     vahed(kk).x=accelerometer(dera2(kk-1):dera2(kk),:);
% end
% %pwelch zadan roye vahedhaye 200m joda shodeh dadehaye acceleromet
%
% window=round(length(vahed(kk).x(:,4))/1);
% noverlap=window/2;
% freq=0:1:50;
% nfreq=length(freq);
% fs=100;
% [pxx(kk).x,f(kk).x]=pwelch(vahed(kk).x(:,4),window,noverlap,freq,fs);
%
% end
% matricakhar=zeros(61,nfreq+4);
% for kkk= 1:61
%     matricakhar(kkk,1:end)=[akhar(kkk,1:4),pxx(kkk).x]; % [200*k,STD rail chap,STD rail rast,STD miyangin,pwelch har 200m
%     accelerometer]
% end
%
%
% tt=0;
% matricakhardiv=zeros(43,nfreq+4);
% [trainind,valuind,~]=dividerand(61,0.7,0.3,0);
% for kkkk=trainind
%     tt=tt+1
%     matricakhardiv(tt,:)=matricakhar(kkkk,:); % matricakhardiv=[200*k,STD rail chap,STD rail rast,STD miyangin,pwelch har 200m
%     accelerometer]
% end
% [~,~,~,~,beta,pctvar]=plsregress(matricakhardiv(:,5:end),matricakhardiv(:,2));
% sumpctvar=cumsum(pctvar(2,:));
%
% joda kardan vahedhaye 35m az dadehaye shetab phyphox va ejad hamposhani dar dadeha
ebteda=floor(finishgaz(1,4));
tim1=finishgaz(1,:);
if p~=1
    pxxcover[]=;
end
pxxcover.x[]=;
if p~=1
    coveracc[]=;
end
coveracc.x[]=;
for ll=1>window_cover
    ind1(ll)=find(finishgaz(:,4)>=ebteda+leng_cover*(ll-1),1);
    ind2(ll)=find(finishgaz(:,4)>=ebteda+leng_notcover+leng_cover*(ll-1) & finishgaz(1,4)<=ebteda+leng_notcover+leng_cover*(ll-
1)+10,1);
    tim2=tim1(ind1(ll));
    tim3=tim1(ind2(ll));

    timaccind1(ll)=find(accelerometer(:,1)>=tim2 & accelerometer(:,1)<=tim2+0.1 ,1 );

```

```

timaccind2(ll)=find(accelerometer(:,1)>=tim3 & accelerometer(:,1)<=tim3+0.1 ,1 );
coveracc(ll).x=accelerometer(timaccind1(ll):timaccind2(ll),:);
window=round(length(coveracc(ll).x(:,4))/1);
noverlap=window/2;
freq=0:0.5:50;
nfreq=length(freq);
fs=100;
[pxxcover(ll).x,~]=pwelch(coveracc(ll).x(:,4),window,noverlap,freq,fs);
end

barresitimaccind=[timaccind1;timaccind2];
barresiindex=[ind1;ind2];
matricakharcover=zeros(window_cover,nfreq+3);
for w=1:window_cover
    matricakharcover(w,1:end)=[stdakharcover(w,:),pxxcover(w).x];
end

mat(p).x=matricakharcover;
end
matricproject=zeros(num_travel*window_cover,nfreq+3);
g=1;
for o=1:window_cover
    matricproject(g:g+3,:)= [mat(1).x(o,:);mat(2).x(o,:);mat(3).x(o,:);mat(4).x(o,:)];
    g=g+4;
end

% ignor kardan dadehayee ke NAN hastand

matricproject(isnan(matricproject))=0;
nan_cel=find(matricproject(:,1)==0);
matricproject(nan_cel,:)=[];

% dar yek satr garar dadane pwelch haye safarhaye mokhtalef

tul=length(matricproject(:,1))/num_travel;
matricproject_row=zeros(tul,num_travel*length(matricproject(1,4:end))+3);
for ii= 1:tul
    jj=ii

matricproject_row(jj,1:end)=[matricproject(ii,1:3),matricproject(ii,4:end),matricproject(ii+1,4:end),matricproject(ii+2,4:end),matricproject(ii+3,4:end)];
end

% plsregress gereftan satree

l_m_r1=length(matricproject_row(:,1));
l_m_r2=length(matricproject_row(1,:));
[~,~,~,betacoverrast_culm,pctvarcoverrast_culm]=plsregress(matricproject_row(1:l_m_r1,4:end),matricproject_row(1:l_m_r1,2));
%plsregress bar roye dadehaye rail rast
[~,~,~,betacoverchap_culm,pctvarcoverchap_culm]=plsregress(matricproject_row(1:l_m_r1,4:end),matricproject_row(1:l_m_r1,1));
%plsregress bar roye dadehaye rail chap

[~,~,~,betacovermiyangin_culm,pctvarcovermiyangin_culm]=plsregress(matricproject_row(1:l_m_r1,4:end),matricproject_row(1:l_m_r1,3));
%plsregress bar roye dadehaye rail miyangin
sumpctvarcoverrast_culm=cumsum(pctvarcoverrast_culm(2,:));
sumpctvarcoverchap_culm=cumsum(pctvarcoverchap_culm(2,:));
sumpctvarcovermiyangin_culm=cumsum(pctvarcovermiyangin_culm(2,:));
goodfitness=[sumpctvarcoverchap_culm',sumpctvarcoverrast_culm',sumpctvarcovermiyangin_culm' ];
plot(cumsum(100*pctvarcoverrast_culm(2,:)),'-bo');

% % plsregress zadan va goodfitness gereftan
%
% l_p=length(matricproject(:,1));
% [~,~,~,betacoverrast,pctvarcoverrast]=plsregress(matricproject(1:l_p,4:nfreq+3),matricproject(1:l_p,2)); %plsregress bar roye
dadehaye rail rast
% [~,~,~,betacoverchap,pctvarcoverchap]=plsregress(matricproject(1:l_p,4:nfreq+3),matricproject(1:l_p,1)); %plsregress bar roye
dadehaye rail chap

```

```

% [~,~,~,betacovermiyangin,pctvarcovermiyangin]=plsregress(matricproject(1:l_p,4:nfreq+3),matricproject(1:l_p,3)); %plsregress bar
roye dadehaye rail miyangin
% sumpctvarcoverrast=cumsum(pctvarcoverrast(2,:));
% sumpctvarcoverchap=cumsum(pctvarcoverchap(2,:));
% sumpctvarcovermiyangin=cumsum(pctvarcovermiyangin(2,:));
% goodness=[sumpctvarcoverchap',sumpctvarcoverrast',sumpctvarcovermiyangin' ];
% plot(cumsum(100*pctvarcoverrast(2,:)),'-bo');

% tt=0;
% [trainindcover,valuind,~]=dividerand(316,0.7,0.3,0)
% no=length(trainindcover);
% matricakharcoverdiv=zeros(no,nfreq+3);
%
% for kkk=trainindcover
%   tt=tt+1
%   matricakharcoverdiv(tt,:)=matricakharcover(kkk,:); % matricakharcoverdiv=[STD rail chap,STD rail rast,STD miyangin,pwelch
har 200m accelerometer]
% end
% [~,~,~,betacoverrast,pctvarcoverrast]=plsregress(matricakharcoverdiv(1:no,4:54),matricakharcoverdiv(1:no,2)); %plsregress bar roye
dadehaye rail rast
% [~,~,~,betacoverchap,pctvarcoverchap]=plsregress(matricakharcoverdiv(1:no,4:54),matricakharcoverdiv(1:no,1)); %plsregress bar roye
dadehaye rail chap
% [~,~,~,betacovermiyangin,pctvarcovermiyangin]=plsregress(matricakharcoverdiv(1:no,4:54),matricakharcoverdiv(1:no,3)); %plsregress
bar roye dadehaye rail miyangin
% sumpctvarcoverrast=cumsum(pctvarcoverrast(2,:));
% sumpctvarcoverchap=cumsum(pctvarcoverchap(2,:));
% sumpctvarcovermiyangin=cumsum(pctvarcovermiyangin(2,:));
% goodness=[sumpctvarcoverchap',sumpctvarcoverrast',sumpctvarcovermiyangin' ];
% joda kardan 200m aval az accelerometer

%locationb=finish;
%a=find(locationb(:,4)>=200 & locationb(:,4)<=220); % peida kardan derayah 200 aval az location
%a=min(a) % entekhab min derayah
%b=locationb(1,:);
%t=b(a); % zamani ke 200 aval tey mishavad
%tt=find(accelerometer(:,1)>=t & accelerometer(:,1)<=t+0.02 );
%tt=min(tt)
%w=488361 % shomare derayei ke migoyad az een lahzeh dar tabloy bandargaz hastim.
%p=accelerometer(w:tt,1:end);

%dataz=[p(:,1),p(:,4)];
>window=round(length(p(:,1))/1);
>noverlap=window/2;
>freq=0:0.1:50;
>fs=100;
>[pxx,f]=pwelch(p(:,4),window,noverlap,freq,fs);
>subplot(512);
>plot(p(:,1),p(:,4));
>title 'row data acceleration of phyphox';
>xlabel('zaman');
>ylabel('acceleration');
>subplot(513);
>plot(f,10*log10(pxx));
>title 'get pwelch to phyphox acceleration';
>xlabel('frequency')
>ylabel('db');
% joda kardan 200 aval az dadehaye bandargazgalugah

%a1=bandargazgalugah(1:16,:);
%a2=a1(1,:);
%a3=length(a2);
%dd=zeros(a3,1);
%dd(1)=0;
%for j=1:a3-1
%   dd(j+1)=a2(j)-a2(j+1);
%end
%masafat=1000*cumsum(dd);
%a4=find(masafat>=200 & masafat<=201);
%a5=min(a4);

```

```
%a6=[masafat,a1];
%a7=a6(1:a5,:);
%subplot(514);
%plot(a7(:,1),a7(:,4));
%title 'raw data of EM120' , xlabel 'masafat meter' , ylabel 'LLL';
%st=std(a7(:,4));
%ss=num2str(st);
%lgd=legend(num2str(st),'earthnorth');
%title(lgd,'standard deviation');
%subplot(515);
%plot(a7(:,1),a7(:,5));
%title 'raw data of EM120' , xlabel 'masafat meter' , ylabel 'LLR1';
%st=std(a7(:,5));
%ss=num2str(st);
%lgd=legend(num2str(st),'earthnorth');
%title(lgd,'standard deviation');
>window=round(length(a7(:,1))/1);
>noverlap=window/2;
%freq=0:0.1:20;
%fs=100;
%[pxx,f]=pwelch(a7(:,4),window,noverlap,freq,fs);
%subplot(313);
%plot(f,10*log10(pxx));
%title 'get pwelch ALL' , xlabel('frequency') , ylabel('db');
```