



The University of Tehran Press

## A Structural Framework for Monitoring Stray Currents in DC Electric Rail Transportation Systems Using a Condition-Based Maintenance (CBM) Approach

Hadi Alinia Gardroudbari<sup>1\*</sup> | Seyed Mostafa Ghazizadeh Hashemi<sup>2</sup> | Shayesteh Ebrahimi Zaker<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Ph.D Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [hadi.alinia@ut.ac.ir](mailto:hadi.alinia@ut.ac.ir)

2. Dean of the University, Transportation and Traffic of Tehran Municipality. Tehran, Iran. Email: [m.ghazizadehashemi@gmail.com](mailto:m.ghazizadehashemi@gmail.com)

3. Ph.D Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [ebrahimizaker.sh@ut.ac.ir](mailto:ebrahimizaker.sh@ut.ac.ir)

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article type:</b><br/>Research Paper</p> <p><b>Article History:</b><br/><b>Received:</b> 22 May 2025<br/><b>Revised:</b> 21 July 2025<br/><b>Accepted:</b> 26 September 2025<br/><b>Published Online:</b> 15 January 2025</p> <p><b>Keywords:</b><br/>Stray current,<br/>Condition monitoring,<br/>Condition-based maintenance,<br/>ISO 13374,<br/>OSA-CBM.</p> | <p>In DC electric rail systems, the use of running rails as the return path for the train's electric current-due to the low electrical resistance (poor insulation) between the running rails and the ground, as well as the potential difference between the rails and the ground-leads to part of the return current leaking into the ground beneath the rails. This phenomenon, known as stray current or leakage current, can cause various issues, including electrochemical corrosion and a reduction in the service life of rails and nearby metallic underground infrastructure. Electrochemical corrosion caused by stray currents in metallic structures is a long-term process, and the results of irregular periodic measurements of stray currents cannot accurately reflect the extent of corrosion. Therefore, continuous measurement and monitoring of stray currents, along with analyzing their variation trends, is essential. This study explores the concept of Condition Monitoring (CM) and Condition-Based Maintenance (CBM), analyzing the structure of key standards in this field, such as ISO 13374 and the OSA-CBM standard. Finally, considering the frameworks of these referenced standards, a model is proposed for monitoring stray currents in a DC electric rail transportation system using a condition-based maintenance approach.</p> |

**Cite this article:** Alinia Gardroudbari, H.; Ghazizadeh Hashemi, M. & Ebrahimi Zaker, Sh. (2026). A Structural Framework for Monitoring Stray Currents in DC Electric Rail Transportation Systems Using a Condition-Based Maintenance (CBM) Approach. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 187-200. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394548.1142>



© Hadi Alinia Gardroudbari, Seyed Mostafa Ghazizadeh Hashemi, Shayesteh Ebrahimi Zaker

**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394548.1142>

### Introduction

DC electric railway transportation systems are among the most efficient and environmentally friendly modes of urban transport. However, these systems face various technical challenges, one of the most critical being the phenomenon of stray current. Stray currents, which result from the unintended leakage of electric current from the return path (typically the running rails), can cause significant damage to nearby metallic structures such as pipelines and reinforced concrete foundations through electrochemical corrosion. Managing and mitigating these currents is essential to ensuring the reliability, safety, and longevity of railway infrastructure. The complexity of detecting and monitoring stray currents under operational conditions necessitates the use of advanced monitoring systems, data analysis methods, and predictive maintenance strategies.

## **Methodology**

This research investigates the application of Condition-Based Maintenance (CBM) strategies and condition monitoring systems to detect and manage stray currents in DC railway systems. In particular, it utilizes frameworks such as ISO 13374 and the OSA-CBM architecture, which provide a standardized structure for data collection, processing, and diagnostic decision-making. The aim is to enable real-time condition assessment and predictive maintenance by analyzing operational data gathered from various sensors installed across the railway system. These sensors measure parameters such as voltage gradients, rail-to-earth potentials, and current leakages at critical locations.

The process begins with data acquisition, which involves the continuous collection of sensor data related to system health and potential stray current activity. This data is then processed through signal conditioning and data reduction techniques to extract meaningful features. Subsequently, diagnostic algorithms are employed to detect anomalies and identify the presence and source of stray currents. Finally, prognostic models estimate the remaining useful life of affected components and generate recommendations for maintenance interventions.

## **Key Results**

The proposed condition monitoring system was evaluated through simulations and case studies on an urban DC railway line. The results demonstrate that integrating CBM with stray current detection significantly improves the system's ability to identify early-stage corrosion risks and electrical anomalies. The implementation of ISO 13374-compliant modules enabled structured data flow from collection to maintenance decision-making. Moreover, predictive models successfully estimated the degradation rate of affected components, allowing for timely intervention and minimizing infrastructure damage.

Analysis showed that the use of real-time monitoring and AI-based diagnostics led to a 40% reduction in unplanned maintenance activities and a substantial extension in the lifespan of trackside infrastructure. Additionally, the structured use of data under the OSA-CBM framework ensured system interoperability and scalability for future expansions. These findings confirm the potential of intelligent condition monitoring systems to enhance the safety, cost-efficiency, and sustainability of DC electric railway operations.



انتشارات دانشگاه تهران

## فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیک: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

# معرفی ساختاری جهت پایش جریان‌های سرگردان در سیستم حمل‌ونقل ریلی برقی DC با رویکرد نگهداری بر مبنای وضعیت (CBM)

هادی علی‌نیا گردودباری<sup>\*۱</sup> | سید مصطفی قاضی‌زاده هاشمی<sup>۲</sup> | شایسته ابراهیمی ذاکر<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [hadi.alinia@ut.ac.ir](mailto:hadi.alinia@ut.ac.ir)
۲. رئیس دانشگاه حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران، تهران، ایران. رایانامه: [m.ghazizadehashemi@gmail.com](mailto:m.ghazizadehashemi@gmail.com)
۳. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [ebrahimzaker.sh@ut.ac.ir](mailto:ebrahimzaker.sh@ut.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

جریان سرگردان،

پایش وضعیت،

نگهداری بر مبنای وضعیت،

ISO13374،

OSA-CBM.

استفاده از ریل‌های حرکت به عنوان مسیر برگشت جریان الکتریکی ترن‌ها در سیستم ریلی برقی DC، به علت کوچک بودن مقاومت الکتریکی (ضعف عایقی) بین ریل‌های حرکت و زمین و همچنین، اختلاف ولتاژ بین ریل و زمین، شرایط نفوذ بخشی از جریان برگشتی ترن را از طریق ریل‌های حرکت به زمین زیر ریل فراهم می‌کند که به جریان نشتی یا جریان سرگردان مشهور است. این جریان باعث ایجاد مشکلات متعددی از جمله خوردگی الکتروشیمیایی و کاهش طول عمر مفید ریل‌ها و تأسیسات فلزی زیرزمینی مجاور خط راه آهن برقی می‌شود. خوردگی الکتروشیمیایی ناشی از جریان‌های سرگردان در سازه‌های فلزی رخدادی بلندمدت است و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای جریان‌های سرگردان نامنظم نمی‌تواند نمایانگر میزان خوردگی باشد. بنابراین، اندازه‌گیری و پایش مداوم جریان‌های سرگردان و بررسی روند تغییرات آن‌ها ضرورتی اجتناب ناپذیر می‌شود. در این مجال پس از آشنایی با مفهوم پایش وضعیت (CM) و بررسی سیستم نگهداری بر مبنای وضعیت (CBM)، ساختار مهم‌ترین استانداردهای موجود در این زمینه از جمله استاندارد ISO13374 و استاندارد OSA-CBM مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و در نهایت با مد نظر قرار دادن چارچوب استانداردهای مورد اشاره، مدلی به منظور پایش جریان‌های سرگردان در یک سیستم حمل‌ونقل ریلی برقی DC با رویکرد نگهداری مبتنی بر وضعیت ارائه شد.

**استناد:** علی‌نیا گردودباری، هادی؛ قاضی‌زاده هاشمی، سید مصطفی و ابراهیمی ذاکر، شایسته (۱۴۰۴). معرفی ساختاری جهت پایش جریان‌های سرگردان در سیستم حمل‌ونقل ریلی برقی DC با رویکرد نگهداری بر مبنای وضعیت (CBM). *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۱) ۱۸۷-۲۰۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394548.1142>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© هادی علی‌نیا گردودباری، سید مصطفی قاضی‌زاده هاشمی، شایسته ابراهیمی ذاکر

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394548.1142>



## جدول علائم اختصاری

| توضیح                                                                   | شرح کامل (انگلیسی)               | شرح کامل (فارسی)       | علامت / اختصار           |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|
| نوعی جریان که در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری رایج است.                 | Direct Current                   | جریان مستقیم           | DC                       |
| نوعی جریان که در برخی سیستم‌های ریلی برون‌شهری استفاده می‌شود.          | Alternating Current              | جریان متناوب           | AC                       |
| روش نگهداری با استفاده از پایش وضعیت تجهیز                              | Condition-Based Maintenance      | نگهداری بر مبنای وضعیت | CBM                      |
| تشخیص زودهنگام خرابی با اندازه‌گیری پارامترهای فنی                      | Condition Monitoring             | پایش وضعیت             | CM                       |
| استاندارد بین‌المللی برای ساختار سیستم پایش وضعیت                       | ISO 13374                        | استاندارد پایش وضعیت   | ISO13374                 |
| چارچوب پیشنهادی برای سیستم‌های CBM                                      | Open System Architecture for CBM | معماری باز برای CBM    | OSA-CBM                  |
| عنصر اصلی سازه‌های فلزی که مستعد خوردگی است.                            | Iron                             | آهن                    | Fe                       |
| محصول واکنش الکتروشیمیایی خوردگی                                        | Hydroxide Ion                    | یون هیدروکسید          | OH <sup>-</sup>          |
| در واکنش‌های الکتروشیمیایی نقش انتقال بار دارد.                         | Electron                         | الکترون                | e <sup>-</sup>           |
| نقطه‌ای که جریان از سازه فلزی خارج می‌شود و خوردگی در آن رخ می‌دهد.     | Anodic Region                    | ناحیه آندی             | Anodic Area              |
| نقطه‌ای که جریان وارد سازه فلزی می‌شود.                                 | Cathodic Region                  | ناحیه کاتدی            | Cathodic Area            |
| جریان مورد نیاز برای حرکت قطار                                          | Traction Current                 | جریان کشش              | Traction Current         |
| جریانی که از موتور به پست باز می‌گردد، ممکن است بخشی از آن سرگردان شود. | Return Current                   | جریان برگشتی           | Return Current           |
| بخشی از جریان برگشتی که وارد زمین و سازه‌های مجاور می‌شود.              | Stray Current                    | جریان سرگردان          | Stray Current            |
| شاخصی مهم برای ارزیابی نشتی جریان                                       | Rail-to-Earth Resistance         | مقاومت بین ریل و زمین  | Rail-to-Earth Resistance |
| تفاوت ولتاژ بین دو نقطه                                                 | Electrical Potential             | پتانسیل                | Potential                |

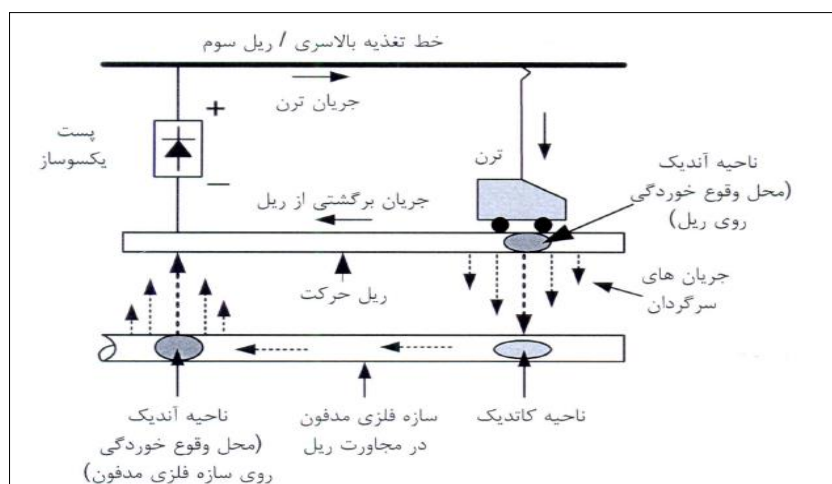
## ۱. مقدمه

امروزه، سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی برقی به طور گسترده در مناطق شهری و برون‌شهری سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها به علت داشتن مزایای متعددی مثل قابلیت شتاب‌گیری زیاد، کارایی مطمئن، ظرفیت بالا در جابه‌جایی مسافر و کالا، استفاده بهینه از منابع انرژی و زمین، کاهش حجم ترافیک در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، کاهش آلودگی هوا، حفظ محیط زیست و همچنین، به لحاظ طول عمر بالای تجهیزات از اهمیت بالایی در مقایسه با سایر سیستم‌های حمل‌ونقل برخوردارند [۱]. از طرفی به دلایل اقتصادی، در بیشتر سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی برقی DC، ریل‌های فولادی علاوه بر نقش تکیه‌گاه و مسیر حرکت ترن‌ها، نقش مسیر یا هادی برگشت جریان الکتریکی ترن‌ها به شینه منفی پست‌های برق تغذیه‌کننده سیستم ریلی را نیز ایفا می‌کنند. در این صورت، نیاز به نصب هادی برگشت جریان و صرف هزینه اضافی نیست، اما با حذف هادی برگشت جریان مصرفی ترن‌ها و استفاده از ریل‌های حرکت به جای آن، به علت کوچک بودن مقاومت الکتریکی (ضعف عایقی) بین ریل‌های حرکت و زمین و همچنین، اختلاف ولتاژ بین ریل و زمین، بخشی از جریان برگشتی ترن از طریق ریل‌های حرکت به زمین زیر ریل نفوذ می‌کند که به جریان نشتی یا جریان سرگردان مشهور است. این جریان باعث ایجاد مشکلات متعددی مثل افزایش ولتاژ ریل‌ها نسبت به زمین (کاهش ایمنی افراد در برابر خطرات برق‌گرفتگی) و همچنین، آسیب‌های خاص جریان‌های سرگردان (خوردگی الکتروشیمیایی و کاهش طول عمر مفید ریل‌ها و تأسیسات فلزی زیرزمینی مجاور خط راه‌آهن برقی) می‌شود. در ادامه نحوه اثرگذاری جریان سرگردان بر تأسیسات فلزی مجاور مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲ و ۳].

## ۲. جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی برقی DC و اثرات مخرب آن‌ها

مطابق شکل ۱ جریان‌های سرگردان از شینه مثبت منبع تغذیه حرکت و از طریق ریل‌ها وارد زمین می‌شوند و مسیر خود را برای رسیدن به شینه منفی پست از طریق زمین (خاک، بتن، آسفالت و غیره که نقش الکترولیت را دارد) و تأسیسات فلزی زیرزمینی

(شبکه‌های فلزی دال بتنی و دیواره تونل، لوله‌های گاز، آب و ...) که در نزدیکی و یا در امتداد ریل‌ها قرار دارند می‌بندند. نقطه‌ای که در آن جریان وارد سازه فلزی می‌شود، به ناحیه کاتدیک و نقطه‌ای که جریان از سازه فلزی خارج می‌شود، به ناحیه آندیک معروف است. خروج جریان در ناحیه آندیک باعث ایجاد پدیده خوردگی روی سازه فلزی می‌شود. در محل آند مطابق روابط ۱ تا ۳ واکنش الکتروشیمیایی رخ می‌دهد و با آزاد شدن الکترون و واکنش آن با اکسیژن و رطوبت محیط و تبدیل شدن به هیدروکسید آهن، پدیده خوردگی اتفاق می‌افتد [۴].



شکل ۱. مسئله جریان‌های سرگردان در خطوط ریلی برقی DC

به طور کلی، مهم‌ترین اثرات نامطلوب جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی برقی DC عبارت‌اند از: [۵]

- خوردگی سازه‌های فلزی واقع در مسیر جریان‌های سرگردان؛
  - افزایش پتانسیل سیستم زمین؛
  - تضعیف یا حتی معکوس کردن فرایند حفاظت کاتودیک تأسیسات فلزی زیرزمینی؛
  - تخریب تجهیزات الکتریکی حساس (تجهیزات حفاظتی و تجهیزات مخابراتی)؛
  - ایجاد خطا در سیستم‌های ناوبری قطارهای برقی؛
  - تخریب عایق تجهیزات الکتریکی سیستم‌های برقی و عایق تأسیسات فلزی زیرزمینی؛
  - کاهش کارایی و راندمان سیستم ریلی برقی.
- تنها مزیت جریان‌های سرگردان، کاهش ولتاژ تماسی ریل و در نتیجه، افزایش ایمنی افراد در برابر شوک‌های الکتریکی ناشی از تماس بدن افراد با ریل‌های خطوط مترو است [۶].
- بنابراین، جریان‌های سرگردان در نقاطی که از فلزات (مثل خط ریل، لوله‌های فلزی دفن‌شده، فونداسیون فلزی سازه‌های بتنی، سازه‌های فلزی دفنی، زره کابل‌ها و غیره) خارج می‌شود باعث خوردگی در آن نقاط می‌شوند. بنابراین، برای کاهش و کنترل جریان‌های سرگردان از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که قبل از هرگونه اقدام مقتضی، پایش و اندازه‌گیری دقیق جریان‌های سرگردان حائز اهمیت است [۷].

### ۳. ضرورت پایش جریان‌های سرگردان در سیستم حمل‌ونقل ریلی DC

جریان‌های سرگردان تولیدشده در سیستم حمل‌ونقل ریلی DC می‌تواند از راه‌های مختلفی شامل کم کردن فاصله بین پست‌های

برق، کاهش جریان مصرفی در عملیات، افزایش مقاومت ریل به زمین و ... کاهش یابد، اما به کارگیری تمامی این روش‌ها نیازمند شناخت رفتار متغیر و مشخصات توزیع جریان‌های سرگردان است [۸ و ۹].

در فرایند سیر قطار بین دو ایستگاه و هنگام شتاب‌گیری قطار، حرکت، کاهش شتاب و ... مصرف انرژی کشش متفاوت است و به این ترتیب جریان محرکه به طور پیوسته تغییر می‌یابد. با توجه به میزان بار کشش و مکان حضور ناوگان کشنده نسبت به پست برق، پتانسیل ریل به زمین نیز متغیر است و شدت و جهت جریان سرگردان مدام نوسان دارد، بنابراین نقطه آندیک و کاتدیک روی سازه‌های فلزی تغییر می‌یابد. سایر شرایط بهره‌برداری از خطوط مترو همانند سیر قطارها در دو جهت متفاوت نیز تغییرات جریان‌های سرگردان را پیچیده‌تر می‌کند. لذا این ویژگی‌های دینامیک جریان‌های سرگردان به کارگیری سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب را ضروری می‌سازد [۱۰].

تعیین دقیق توزیع جریان سرگردان تقریباً امری غیرممکن است. جریان سرگردان را تنها از طریق شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و تحت شرایط ایده‌آل با یکنواخت در نظر گرفتن مقاومت‌های ریل به زمین تخمین زد. جریان‌های سرگردان سیگنال‌های متغیری هستند که میانگین و انحراف معیار مقادیر آن‌ها طی زمان تغییر می‌کند. از طرفی، خوردگی الکتروشیمیایی ناشی از جریان‌های سرگردان در سازه‌های فلزی رخدادی بلندمدت است و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های دوره‌ای جریان‌های سرگردان نامنظم نمی‌تواند نمایانگر میزان خوردگی باشد. بنابراین، اندازه‌گیری و پایش مداوم جریان‌های سرگردان و بررسی روند تغییرات آن‌ها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر می‌شود [۱۱]. به این ترتیب، اهداف پیاده‌سازی یک سیستم پایش جریان‌های سرگردان به طور خاص شامل موارد ذیل است [۱۲]:

- ایجاد یک سیستم به صرفه و اندازه‌گیری تأثیر آن روی سازه‌های فلزی مجاور؛
  - شناسایی رفتار جریان سرگردان و بزرگی آن در شرایط مختلف به خصوص در سناریوهای بدتر؛
  - به کارگیری نتایج سیستم در طراحی‌های جدید خطوط مترو و ایجاد و استقرار سیستم‌های نوین.
- در ادامه، مفهوم دقیق‌تر پایش وضعیت را تعریف می‌کنیم و به معرفی چارچوب نگهداری بر اساس وضعیت می‌پردازیم.

#### ۴. پایش وضعیت و نگهداری بر مبنای وضعیت

مراقبت وضعیت یا پایش وضعیت (CM) هسته اصلی استراتژی نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت (CBM) به شمار می‌رود. این استراتژی بر این باور استوار است که اغلب خرابی‌های تجهیزات، پس از رسیدن به یک مرحله مشخص، نشانه‌هایی از خود بروز می‌دهند که می‌توان این نشانه‌ها را به صورت ارتعاش‌ها، صدا، امواج آلتراسونیک، ذرات فرسایشی، دما و ... تشخیص داد و وقوع خرابی را پیش‌بینی کرد. لذا می‌توان قبل از رسیدن خرابی به مراحل بحرانی، با برنامه‌ریزی فعالیت‌های پیشگیرانه نگهداری و تعمیرات و اجرای آن‌ها، پیشرفت خرابی را متوقف ساخت [۱۳]. خرابی بالقوه، مرحله‌ای از خرابی است که اولین نشانه‌های خرابی قابل اندازه‌گیری و تشخیص هستند.

تشخیص خرابی در مراحل اولیه، از طریق تکنیک‌های CM صورت می‌پذیرد و این تکنیک‌ها روند رو به رشد خرابی و نیز نرخ رشد آن را نشان می‌دهند. لذا می‌توان در اولین فرصت و قبل از رسیدن به مراحل بحرانی، فعالیت تعمیراتی را انجام داد و از رشد خرابی جلوگیری کرد. با اندازه‌گیری و ردگیری تغییرات پارامترهای نشان‌دهنده وضعیت یک تجهیز، زمان و نوع تعمیرات واقعی مورد نیاز قابل پیش‌بینی است [۱۴].

قدرت استراتژی پایش وضعیت به انتخاب نوع پارامترهای پایش وضعیت، مشخصات اندازه‌گیری، نقاط (و جهت) اندازه‌گیری، فواصل بین اندازه‌گیری و شرایط عملکرد تجهیز هنگام اندازه‌گیری بستگی دارد و نمی‌توان با انتخاب تنها یک پارامتر انتظار داشت تمامی عیب‌ها تحت پایش قرار گیرد. مهم‌ترین مرحله از برنامه‌ریزی پایش وضعیت هنگام پیاده‌سازی و تنظیمات اولیه آن است. به بیانی، برای هر تجهیز ابتدا باید عیوب بالقوه (مودهای شکست) شناسایی و سپس، نوع سیگنال‌های آشکارکننده این عیوب و زمان آشکارسازی آن‌ها تعیین شود. بدیهی است سیگنال‌هایی که زودتر از سایر سیگنال‌ها عیب را آشکار کنند، از اولویت برخوردار هستند. همچنین، واضح است که یک نوع سیگنال نمی‌تواند برای هر نوع عیب اولین سیگنال آشکارکننده باشد. در مرحله بعد، لازم است مشخصات اندازه‌گیری‌ها تعیین شده و سپس منابع مورد نیاز اجرای پایش وضعیت شامل تجهیزات مورد

نیاز و منابع انسانی تعیین شود. نکته مهم اینکه مؤثر بودن روش‌هایی که از داده‌های عملکرد فرایند استفاده می‌کنند به‌شدت به کالیبراسیون سنسورها و تنظیم سیستم‌های کنترل بستگی دارد [۱۴].

با توجه به چالش‌های مورد اشاره در مسیر دستیابی به راهبرد پایش وضعیت و طراحی و استقرار یک نظام توانمند نگهداری و تعمیرات بر مبنای این راهبرد، استانداردهای معتبری در این خصوص تعریف و تدوین شده و مورد پذیرش گسترده قرار گرفته است که با استفاده مناسب و بجا از این استانداردها می‌توان از مزایای استقرار یک سیستم CBM به نحو احسن بهره جست. در ادامه پس از معرفی مهم‌ترین استانداردهای موجود در زمینه پایش وضعیت و بررسی چارچوب‌های پیشنهادی آن‌ها، ساختاری به منظور پایش جریان‌های سرگردان در یک سیستم حمل‌ونقل ریلی برقی DC ارائه می‌شود.

## ۵. استانداردسازی سیستم پایش وضعیت

هدف از استانداردسازی عبارت است از: دستیابی به راه‌حل فنی و اقتصادی بهینه برای مشکلات تکرارپذیر. در واقع، استانداردسازی می‌تواند پیش‌نیازی برای صنعتی‌سازی باشد [۲ و ۱۵]. مهم‌ترین استانداردهای موجود در زمینه پایش وضعیت و سیستم CBM عبارت‌اند از: استاندارد ISO13374 و استاندارد OSA-CBM.

### ۵-۱. ساختار کلی سیستم CBM در استاندارد ISO13374

استاندارد ISO13374 خطوط راهنمایی را درخصوص مشخصات نرم‌افزاری و ساختاری سیستم پردازش، ارتباطات و نمایش داده‌ها در راستای پایش وضعیت و شناسایی خرابی‌ها ارائه می‌کند [۱۶]. در این استاندارد، شش بخش کاری در یک سیستم CBM به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های کلی این بخش‌ها مطابق شکل ۲ معرفی می‌شود [۱۷].

ساختار کلی سیستم CBM در استاندارد ISO13374 شامل شش بخش کارکردی برای پردازش داده‌ها و چندین بخش جانبی و پشتیبانی است که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

#### - پردازش داده‌ها

ترکیب هم‌افزایی از تکنولوژی‌ها در این بخش می‌تواند علت و شدت خرابی‌های احتمالی را مشخص کرده و اقدامات عملیات و نگهداری پوشش‌گرا را توجیه کند. ساختار پردازش داده و جریان اطلاعات به صورت دستی یا اتوماتیک همانند شکل جهت اجرای موفق پایش وضعیت پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که در شکل نیز قابل مشاهده است، با افزایش جریان اطلاعات از بلوک گردآوری‌شده به سمت بلوک پشتیبانی تصمیم‌گیری، هر چقدر داده‌ها بیشتر به اطلاعات تبدیل می‌شوند نیاز به نمایش فنی استاندارد و تفاوت‌های ارائه گرافیکی بیشتر می‌شود [۱۸].

جمع‌آوری داده‌ها: خروجی سنسور/مبدل در این بلوک به یک پارامتر دیجیتالی تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده یک کمیت فیزیکی و اطلاعات مرتبط همچون زمان، کالیبراسیون، کیفیت داده، وضعیت سنسور یا جمع‌کننده داده مورد استفاده است.

۱. پالایش داده‌ها: انجام تحلیل سیگنال‌ها، محاسبه توصیف‌گرهای معنادار و استخراج اطلاعات سنسور از اندازه‌گیری‌های خام.

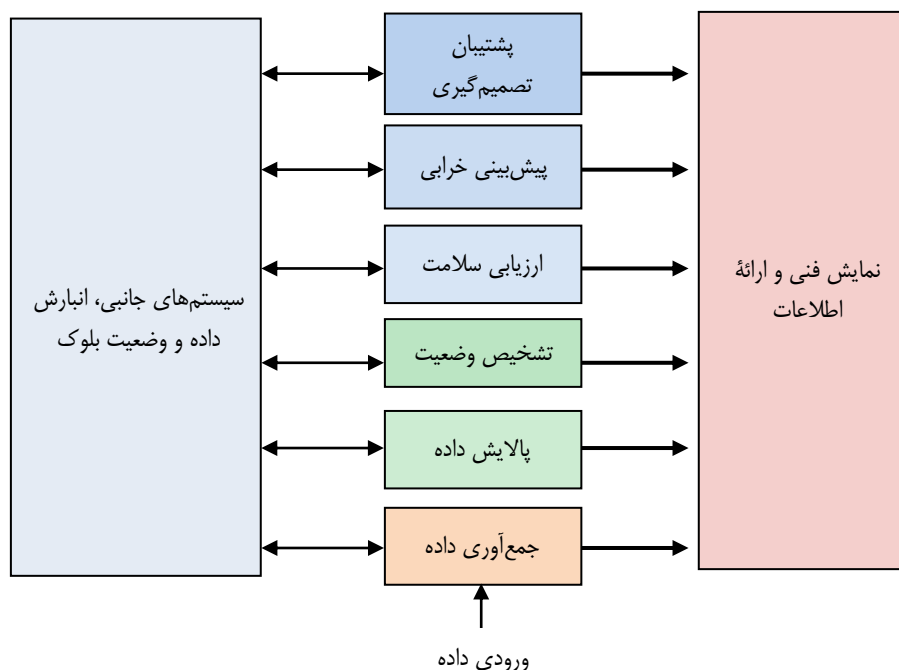
۲. تشخیص وضعیت: تسهیل ایجاد و نگهداری پروفیل‌های پایه نرمال و بررسی موارد غیرنرمال از طریق اعلام هشدار.

سه بلوک بعدی عموماً در راستای ادغام فناوری‌های پایش برای ارزیابی سلامت فعلی تجهیز، پیش‌بینی خرابی‌های آتی و پیشنهاد اقدامات مؤثر برای پرسنل عملیات و نگهداری تلاش می‌کنند.

۳. ارزیابی سلامت: تشخیص هرگونه خطا و برآورد سلامت کنونی تجهیز یا فرایند با ملاحظه تمامی اطلاعات وضعیت.

۴. پیش‌بینی خرابی: تعیین وضعیت‌های سلامت و حالت‌های خرابی در آینده براساس ارزیابی سلامت فعلی و بار کاربرد طرح ریزی‌شده تجهیز/فرایند در کنار پیش‌بینی‌های طول عمر مفید باقی‌مانده.

۵. پشتیبان تصمیم‌گیری: فراهم کردن اطلاعات در خصوص امور قابل انجام در زمینه تغییرات مورد نیاز نگهداری یا عملیات به منظور بهینه‌سازی عمر فرایند/تجهیز.



شکل ۲. ساختار سیستم CBM در استاندارد ISO13374

#### – نمایش فنی

برای تسهیل آنالیز شرایط توسط پرسنل دارای صلاحیت، نمایش‌های فنی مناسب همچون روند تغییرات و نقاط غیرنرمال مربوطه ضروری است. این نمایش‌ها باید داده‌های لازم را برای شناسایی، تأیید و درک یک وضعیت غیرعادی توسط تحلیلگر فراهم آورند [۱۹].

#### – ارائه اطلاعات

تبدیل داده‌ها به فرمتی که به‌وضوح اطلاعات لازم را برای اتخاذ تصمیمات اصلاحی ارائه دهند، بسیار مهم است. این کار می‌تواند به صورت نوشتاری یا عددی برای نشان دادن درجه بزرگی و یا به صورت گرافیکی برای نمایش روند تغییرات و یا ترکیبی از هر سه مورد صورت پذیرد. این اطلاعات باید حاوی داده‌هایی باشند که تجهیز و اجزای آن، نوع خرابی یا خطا، تخمینی از شدت خرابی، تصویری از وضعیت و در نهایت اقدام پیشنهادی را تشریح کنند. فاکتورهای هزینه و ریسک نیز می‌تواند شامل این موارد شود [۲۰].

#### – سیستم‌های جانبی

بازایی سوابق اقدامات قبلی سیستم نگهداری و داده‌های عملیات (شروع/توقف/بار) در ارزیابی سلامت تجهیز یا فرایند دارای اهمیت است. نیاز به ارتباط سریع بین سیستم نگهداری و عملیات نیازمند واسطه‌های نرم‌افزاری بین سیستم‌های مدیریت نگهداری و سیستم‌های کنترل عملیات است [۲۱].

#### – بایگانی داده

ذخیره‌سازی داده‌ها در تمامی بلوک‌های برنامه پایش وضعیت مهم است. روند تغییرات داده‌های قبلی می‌تواند برای بررسی ارتباط آماری مورد تحلیل قرار گیرد. ارزیابی‌های سلامت قبلی در راستای بررسی دقت و اطلاعات مربوط به علل ریشه‌ای خرابی‌ها نیز باید مورد بررسی قرار گیرند [۲۲].

#### – وضعیت بلوک

درخصوص هر بلوک پردازش داده، به اطلاعات وضعیت آن بلوک نیاز داریم که برخی از آن‌ها می‌توانند اطلاعات ایستا باشند و برخی دیگر به طور پویا طی فعالیت سیستم تغییر کنند. به طور مثال، اطلاعات وضعیت بلوک جمع‌آوری شده می‌تواند شامل

محل‌های اندازه‌گیری، وضعیت نسبی سنسور/ مبدل، نرخ نمونه‌برداری، داده‌های راه‌اندازی سنسور و پارامترهای کالیبراسیون باشد. اگرچه رابطه بین بخش‌های کارکردی به صورت سلسله‌مراتبی نشان داده شده است؛ اما محدودیتی در ارتباط بین بخش‌های مختلف وجود ندارد [۲۳].

## ۵-۲. ساختار کلی سیستم CBM در استاندارد OSA-CBM

یکپارچه‌سازی گستره وسیعی از بخش‌ها و اجزای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در کنار ایجاد چارچوبی برای این بخش‌ها جزء ضرورت‌های به‌کارگیری یک سیستم نگهداری بر مبنای وضعیت است. استاندارد OSA-CBM این فرایند را از طریق ایجاد یک ساختار استاندارد و چارچوبی برای اجرای سیستم‌های CBM تسهیل می‌کند. این استاندارد شامل ۶ بخش مستقل کارکردی یک سیستم CBM مطابق با استاندارد ISO13374 است که این بخش‌ها را به همراه تعاملات بین آن‌ها توصیف می‌کند. استاندارد ISO13374 چگونگی اجرای سیستم نگهداری بر مبنای وضعیت، فناوری‌های مورد استفاده و الگوریتم‌های اجرایی را مشخص نمی‌کند و تنها چارچوبی کلی برای پایش وضعیت و موضوع شناسایی خرابی‌ها فراهم می‌آورد. این در حالی است که OSA-CBM انواع داده‌ها را برای پردازش و گزارش نتایج در یک سیستم نگهداری بر مبنای وضعیت به علاوه چگونگی انتقال اطلاعات بین فرایندها و نقاط ذخیره‌سازی تعریف می‌کند. استاندارد OSA-CBM در واقع جنبه کارکردی استاندارد ISO13374 را اجرایی می‌کند و ساختارهای داده و روش‌های تعامل بخش‌های مختلف آن را مشخص می‌سازد [۲۴]. مراحل ایجاد یک سیستم OSA-CBM به این صورت است [۲۵]:

۱. انتخاب فناوری مناسب اجرا: از آنجا که OSA-CBM براساس زبان مدل‌سازی یکپارچه (UML) تعریف می‌شود این سیستم به واسطه میان‌افزارهای گوناگونی همچون خدمات وب، Java RMI و COBRA و DCOM قابل اجراست.
۲. تبدیل زبان مدل‌سازی: تبدیل زبان مدل‌سازی یکپارچه OSA-CBM به یک فرمت قابل استفاده بر مبنای فناوری انتخاب‌شده. به طور مثال اگر فناوری خدمات وب انتخاب شود، باید Uml به Xml تبدیل شود.
۳. انتخاب نوع ارتباط: انتخاب یکی از چهار روش ارتباطی اعم از هم‌زمان، غیرهم‌زمان، خدمتی و تصدیقی.
۴. ایجاد رابط مناسب: ایجاد رابط متناسب با هر یک از بخش‌های کارکردی براساس نوع فناوری و رویکرد ارتباطی مورد انتخاب.
۵. ایجاد مدول‌های پردازش اطلاعات: ایجاد مدول‌های پردازش اطلاعات برای هر بخش کارکردی.
۶. ایجاد یک سیستم کاری: ادغام و یکپارچه‌سازی واسطه‌ها و مدول‌های پردازش اطلاعات در قالب یک سیستم کاری.

## ۶. معرفی ساختار سیستم پایش جریان‌های سرگردان بر اساس CBM

پس از تحلیل چارچوب‌های پیشنهادی استانداردهای مورد بررسی در زمینه پایش وضعیت، در ادامه ساختاری جهت پایش جریان‌های سرگردان در یک سیستم حمل‌ونقل ریلی برقی DC مطابق با ساختار استاندارد ISO13374 و پیشنهادی استاندارد OSA-CBM ارائه می‌شود. بخش‌های مختلف این ساختار به شرح ذیل بوده که نحوه ارتباطات آن‌ها نیز در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است.

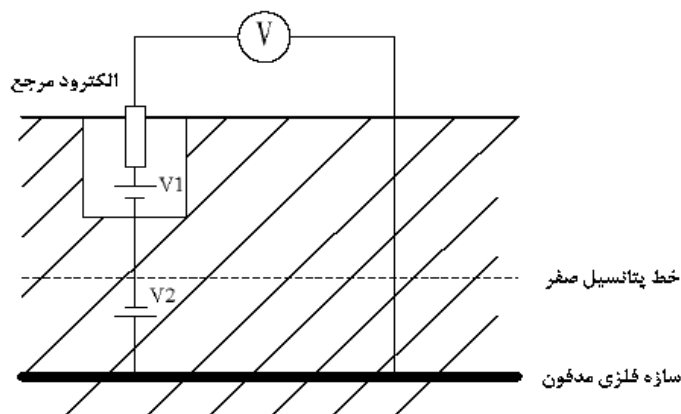
### ۶-۱. الکتروود مرجع

این الکتروود که به عنوان مبنای اندازه‌گیری پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطابق با استاندارد EN50122-2 از جنس Cu/CuSO<sub>4</sub> است و پتانسیل آن با تغییر جریان یا شرایط اندازه‌گیری تغییر نمی‌کند [۲۶].

### ۶-۲. سنسور هوشمند

انواع روش‌های اندازه‌گیری جریان سرگردان در یک سیستم پایش وضعیت به دو صورت است [۲۷]:

- اندازه‌گیری پتانسیل قطبی سازه فلزی مدفون: اگرچه اندازه‌گیری وزن ازدست‌رفته فلز بر اثر خوردگی، روشی ساده و مستقیم برای سنجش سرعت خوردگی فلز محسوب می‌شود؛ اما زمان و سختی اندازه‌گیری در محل، در این روش زیاد است و عموماً میانگین سرعت خوردگی را به دست نمی‌دهد. با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی می‌توان سرعت لحظه‌ای خوردگی را به دست آورد و از طریق منحنی قطبی‌شده خطی، سرعت خوردگی فلز را محاسبه کرد.



شکل ۳. نحوه اندازه‌گیری پتانسیل سازه فلزی مدفون

پایه علمی این مسئله این است که وقتی میزان قطبیت کم است، پتانسیل قطبی‌شده با جریان رابطه مستقیم دارد. بنابراین، می‌توان جریان قطبی‌شده را به طور غیرمستقیم از طریق اندازه‌گیری پتانسیل قطبی‌شده سازه فلزی مدفون محاسبه کرد و از آنجا که جریان نسبت مستقیم با سرعت خوردگی دارد، میزان خوردگی سازه فلزی را به دست آورد (شکل ۳).

- اندازه‌گیری پتانسیل ریل به زمین: نشست جریان سرگردان در یک سیستم مترو تا حد زیادی متأثر از پتانسیل ریل به زمین است. بنابراین، پایش پتانسیل ریل به زمین اهمیت می‌یابد. به لحاظ تئوریک این پتانسیل در واقع اختلاف پتانسیل بین ریل حرکت و زمین بی‌نهایت است. از آنجا که مرجع قرار دادن زمین بی‌نهایت کار دشواری است، از پتانسیل ریل حرکت نسبت به سازه فلزی مدفون به جای پتانسیل ریل به زمین استفاده می‌شود [۲۸].

ورودی داده‌های سنسور هوشمند از طریق الکتروود مرجع، سازه فلزی مدفون و ریل حرکت جمع‌آوری می‌شود و به این ترتیب میکروکمپیوتر موجود در سنسور هوشمند سه پارامتر زیر را اندازه‌گیری می‌کند [۲۸]:

- پتانسیل قطبی‌شده سازه فلزی مدفون؛
- اختلاف پتانسیل ریل حرکت با سازه فلزی مدفون؛
- مقاومت ریل به زمین در سمت منبع تغذیه.

### ۳-۶. پالایش گر سیگنال

برای تضمین دقت و صحت دستگاه پایش، سیگنال‌های آنالوگ توسط یک فیلتر دارای فرکانس پایین پالایش می‌شود. همچنین، فرایند تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال در این مازول مورد استفاده قرار می‌گیرد که زمان بسیار ناچیز تبدیل سیگنال (در حد میکرو ثانیه)، دریافت اطلاعات را در زمان واقعی میسر می‌سازد [۲۹].

### ۴-۶. میکروکنترلر

سیستم پایش جریان‌های سرگردان دارای یک میکروکنترلر به عنوان واحد پردازش مرکزی است که توسط نرم‌ساز و ترسیم‌کننده وضعیت زمان واقعی پشتیبانی می‌شود. ساختار این دستگاه شامل یک برنامه نرم‌افزاری تحلیلی برای تشخیص و تحلیل مقدماتی وضعیت و سیستم ذخیره‌سازی و بازیابی داده‌ها است [۳۰].

### ۶-۵. منبع تغذیه سوئیچینگ

از آنجا که اختلالات الکترومغناطیسی قوی در امتداد ریل حرکت بروز می‌کند، استفاده از فیلتر سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) در مازول منبع تغذیه سوئیچینگ ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این، منبع تغذیه نیروی مورد نیاز CPU و I/O را تأمین می‌کند [۳۱].

### ۶-۶. زمان سنج زمان واقعی

اطلاعات کسب‌شده توسط سنسورها که از طریق واسط شبکه اترنت به طور متناوب به سیستم کامپیوتر مرکزی ارسال می‌شود، علاوه بر داشتن اطلاعات مقادیر اندازه‌گیری‌شده باید دارای اطلاعات زمان مربوطه نیز باشد. همچنین، اموری همچون نمونه‌گیری از پتانسیل طبیعی الکتروود مرجع توسط این تایمر کنترل می‌شود [۳۲].

### ۶-۷. واسط کاربر

مواردی همچون نمایش پویای ولتاژ قطبی‌شده لحظه‌ای و پتانسیل لحظه‌ای ریل به زمین در قالب منحنی، بررسی پارامترهای مهم از جمله بیشینه پتانسیل ریل به زمین و پتانسیل طبیعی الکتروود مرجع، بازخوانی داده‌های قبلی مربوط به وقوع وضعیتی خاص و تنظیم حدود قابل قبول و آستانه هشدار پارامترها تحت پایش در این مازول امکان‌پذیر است [۳۳].

### ۶-۸. انتقال‌دهنده سیگنال

پارامترهای اندازه‌گیری‌شده توسط سنسور هوشمند از طریق خطوط ارتباطی و به وسیله انتقال‌دهنده‌های سیگنال به کامپیوتر مرکزی منتقل می‌شود [۳۱].

### ۶-۹. کامپیوتر مرکزی

سیستم کامپیوتر مرکزی کارکردهای ذیل را تکمیل می‌کند:

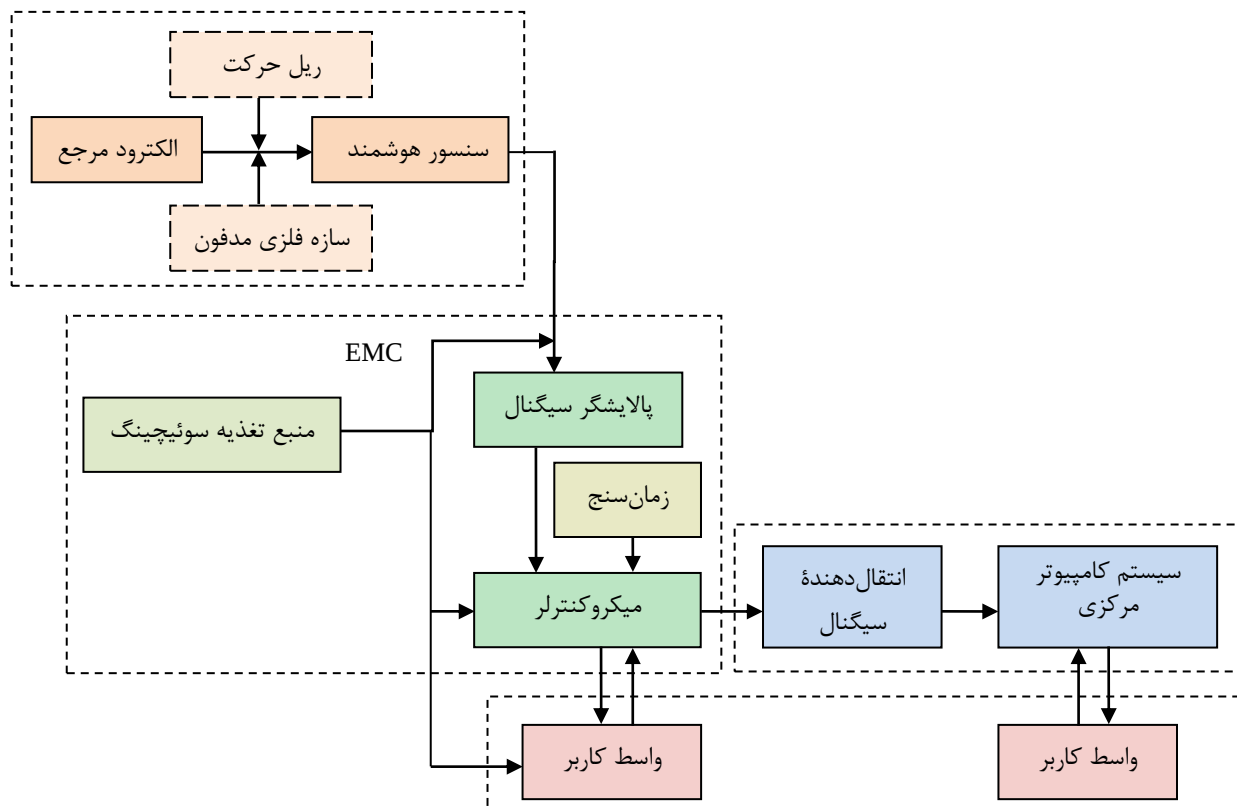
- محاسبه اختلاف پتانسیل ریل حرکت با سازه فلزی مدفون در زمان واقعی؛
- محاسبه پتانسیل قطبی سازه فلزی مدفون نسبت به الکتروود مرجع؛
- سنجش پتانسیل طبیعی الکتروود مرجع در زمان توقف قطارها جهت کالیبراسیون خودکار؛
- محاسبه توزیع ولتاژ ریل حرکتی نسبت به سازه فلزی مدفون؛
- محاسبه تغییر پتانسیل قطبی سازه فلزی مدفون نسبت به الکتروود مرجع؛
- محاسبه میانگین پتانسیل قطبی سازه فلزی مدفون در بازه‌های زمانی مورد نظر (مثلاً هر نیم ساعت)؛
- محاسبه بیشینه ولتاژ ریل حرکتی نسبت به سازه فلزی مدفون؛
- محاسبه مقاومت ریل به زمین در هر بخش از منبع تغذیه.

تمامی داده‌ها در یک پایگاه داده به منظور محاسبه و تحلیل ذخیره‌سازی می‌شوند [۳۴].

همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، تمامی بخش‌های ساختار معرفی‌شده برای سیستم پایش وضعیت جریان سرگردان در یک سیستم حمل‌ونقل ریلی DC در قالب ۴ بلوک و منطبق با استانداردهای مورد بررسی بوده که این سازگاری از طریق تطابق رنگ و به تبع آن، کارکرد بخش‌های مختلف ساختار ارائه‌شده با ساختار یک سیستم CBM در استاندارد ISO13374 که در شکل ۲ ارائه شد، کاملاً مشهود است.

### ۶-۱۰. شبکه اترنت

در یک سیستم پایش جریان سرگردان، یک دستگاه پایش علاوه بر ارتباط با کامپیوتر مرکزی نیاز به تبادل اطلاعات با سایر دستگاه‌های پایش دارد که این ارتباطات از طریق اترنت صنعتی بین دستگاه‌های پایش با کامپیوتر مرکزی و با یکدیگر برقرار می‌شود [۳۵].



شکل ۴. ساختار معرفی شده برای پایش جریان سرگردان در یک سیستم حمل و نقل ریلی برقی DC

## ۶-۱۱. بخش نرم‌افزاری سیستم پایش جریان سرگردان

فاز اولیه کارکرد بخش نرم‌افزاری سیستم پایش جریان سرگردان عبارت است از: تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، تحلیل داده‌ها، کنترل ورودی و خروجی اطلاعات از طریق صفحه کلید و صفحه نمایش و در نهایت، به‌کارگیری اینترنت که با این کارکردها، سه بلوک اول سیستم پایش وضعیت مطابق با استاندارد ISO13374 تحت پوشش قرار می‌گیرد. فاز اصلی کارکرد نرم‌افزاری سیستم پایش جریان‌های سرگردان شامل تشخیص وقوع خطا و برآورد میزان سلامت کنونی، پیش‌بینی حالت‌های خرابی و طول عمر مفید باقی‌مانده بر اساس روند تغییر پارامترها و فراهم کردن اطلاعات درخصوص تغییر برنامه‌های نگهداری و عملیات در راستای بهینه‌سازی عمر تجهیزات است که با به‌کارگیری جزئیات راهنمای استاندارد OSA-CBM، این کارکردها به نحو مطلوبی قابل اجرا است [۳۶].

## ۷. نتیجه‌گیری

با توجه به حضور مداوم جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل ریلی برقی DC و اثرات مخرب آن‌ها بر سازه‌های فلزی مجاور خطوط، طراحی و استقرار یک سیستم پایش جریان‌های ناشی برای نظارت و کنترل اندازه، نحوه رفتار و چگونگی توزیع آن‌ها امری ضروری است. لذا باید با استفاده از استانداردهای معتبر در زمینه ایجاد سیستم نگهداری مبتنی بر وضعیت شامل ISO13374 و OSA-CBM و بر اساس ساختارها و پیشنهادهای ارائه‌شده در استانداردهای یادشده نسبت به طراحی یک سیستم پایش وضعیت جریان‌های سرگردان در سیستم حمل و نقل ریلی برقی DC اقدام کرد. در این مقاله تلاش شد تا الگویی در خصوص سیستم پایش وضعیت جریان‌های سرگردان در سیستم حمل و نقل ریلی برقی DC با رویکرد نگهداری بر مبنای وضعیت و بر پایه استانداردهای معتبر مربوطه معرفی شود که شامل بخش‌های اصلی همچون الکتروود مرجع، سنسور هوشمند، پالایشگر سیگنال، میکروکنترلر، منبع تغذیه سوئیچینگ، زمان‌سنج، واسط‌های کاربر، انتقال‌دهنده سیگنال، کامپیوتر مرکزی، شبکه اینترنت و بخش نرم‌افزاری است.

## منابع

- [1] R. Feizi, H. Yousefi, M. Abdoos, and F. Razi Astaraei, 'Technical and environmental assessment of biofuel utilization in light and heavy vehicles: implications for carbon footprint reduction on high-traffic freeway', *Future Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 1–7, May 2025, doi: 10.55670/fpll.fusus.3.2.1.
- [2] H. Yousefi, N. Zakhimi, S. M. Mousavi Reineh, M. Abdoos, and M. Razeghi, 'Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran)', *Urban Development Policy Making*, vol. 2, no. 1, 2025.
- [3] K. Fardnia, H. Yousefi, and M. Abdoos, 'A bibliometric analysis of carbon and water footprints in renewable energy: The post-COVID-19 landscape', *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 3, p. 100162, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100162.
- [4] E. and M. National Academies of Sciences, *Assessing and Improving AI Trustworthiness: Current Contexts and Concerns: Proceedings of a Workshop—in Brief*. 2021.
- [5] J. W. Park *et al.*, 'Rail surface defect detection and analysis using multi-channel eddy current method based algorithm for defect evaluation.', *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 40, pp. 1–12, 2021.
- [6] M. Niyasati, 'Modeling of electric rail transportation system to determine maximum rail voltage and stray current according to real-world and system conditions [In Persian]', Iran University of Science and Technology, 2009.
- [7] M. G. A. Niastey, 'Modeling of DC electric rail transportation system to control stray current and rail contact voltage [In Persian]', in *21st International Power System Conference*, Tehran, Oct. 2006.
- [8] S. Ahmadi, H. Nezhadayni, M. Asvad, and M. Abdoos, 'Reducing the share of electricity generation from fossil fuels by replacing renewable energies in rainy areas', *Journal of sustainable Energy Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 299–312, 2024, doi: 10.22059/ses.2024.373595.1056.
- [9] A. Wang, S. Lin, G. Wu, X. Li, and T. Wang, 'Characteristic Extraction and Assessment Methods for Transformers DC Bias Caused by Metro Stray Currents.', *Entropy*, vol. 26, no. 7, 2024.
- [10] C. Li, S. Misra, and I. S. Khalil, 'Closed-Loop Control Characterization of Untethered Small-Scale Helical Device in Physiological Fluid with Dynamic Flow Rates.', *Advanced Intelligent Systems*, vol. 5, no. 5, 2023.
- [11] Y. Li, M. Jiao, and Y. Wang, 'Effect of Soil Salt Content on Stray Current Distribution in Urban Rail Transit', *IEEE Access*, vol. 9, 2021.
- [12] A. Y. Jaen-Cuellar *et al.*, 'System for tool-wear condition monitoring in cnc machines under variations of cutting parameter based on fusion stray flux-current processing', *Sensors*, vol. 21, no. 24, 2021.
- [13] H. Varvany Faranpanany, 'Fundamentals of Design and Implementation of Condition-Based Maintenance and Repair System in Industrial Units - Case Study: Shazand Thermal Power Plant [In Persian]', in *2nd Condition Monitoring and Fault Diagnosis Conference*, Tehran, Jul. 2008.
- [14] N. Ahmed, A. A. Hashmani, S. Khokhar, M. A. Tunio, and M. Faheem, 'Fault detection through discrete wavelet transform in overhead power transmission lines.', *Energy Science & Engineering*, vol. 11, no. 11, pp. 4181–4197, 2023.
- [15] A. Tabrizi, H. Yousefi, M. Abdoos, and R. Ghasempour, 'Evaluating renewable energy adoption in G7 countries: a TOPSIS-based multi-criteria decision analysis', *Discover Energy*, vol. 5, no. 1, p. 2, Jan. 2025, doi: 10.1007/s43937-025-00064-w.
- [16] M. Shimizu, S. Perinpanayagam, and B. Namoano, 'Real-time techniques for fault detection on railway door systems', *IEEE*, pp. 1–9, 2022.
- [17] 'ISO13374-1, Condition monitoring and diagnostics of machines – data processing, communication and presentation', 2003.
- [18] Y. Shi *et al.*, 'Semi-universal geo-crack detection by machine learning', *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, 2023.
- [19] S. Shimmi and M. Rahimi, 'On Association of Code Change Types and CI Build Failures in Software Repositories', *European Journal of Information Technologies and Computer Science*, vol. 4, no. 2, pp. 1–15, 2024.

- [20] P. Odeyar, D. B. Apel, R. Hall, B. Zon, and K. Skrzypkowski, 'A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining', *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, 2022.
- [21] H. Koornneef, W. J. Verhagen, and R. Curran, 'A web-based decision support system for aircraft dispatch and maintenance', *Aerospace*, vol. 8, no. 6, p. 154, 2021.
- [22] P. Izquierdo Gomez, M. E. Lopez Gajardo, N. Mijatovic, and T. Dragicevic, 'A Self-Commissioning Edge Computing Method for Data-Driven Anomaly Detection in Power Electronic Systems', *arXiv e-prints*, 2023.
- [23] F. Sohrobi, T. Jiang, and W. Yu, 'Learning progressive distributed compression strategies from local channel state information', *IEEE J Sel Top Signal Process*, vol. 16, no. 3, pp. 573–584, 2022.
- [24] D. Blažević, T. Keser, H. Glavaš, and R. Noskov, 'Power Transformer Condition-Based Evaluation and Maintenance (CBM) Using Dempster–Shafer Theory (DST)."', *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p. 6731, 2023.
- [25] M. R. U. Abadia, 'Desenvolvimento de uma base de conhecimento com regras fuzzy e produção visando monitoramento baseado em condição de uma usina hidrelétrica', 2016.
- [26] British standard, 'EN50122-2, Railway applications - fixed installations', 1999.
- [27] C. Wang, W. Li, Y. Wang, S. Xu, and K. Li, 'Evaluation Model for the Scope of DC Interference Generated by Stray Currents in Light Rail Systems', *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 746, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12040746.
- [28] S. Feliu, 'Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Measurement of the Corrosion Rate of Magnesium Alloys: Brief Review and Challenges', *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 6, p. 775, Jun. 2020, doi: 10.3390/met10060775.
- [29] R. Barazideh, B. Natarajan, A. V. Nikitin, and S. Niknam, 'Performance Analysis of Analog Intermittently Nonlinear Filter in the Presence of Impulsive Noise', *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 68, no. 4, pp. 3565–3573, Apr. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2896924.
- [30] L. Liu, Z. Yu, Z. Jiang, J. Hao, and W. Liu, 'Observation Research on the Effect of UHVDC Grounding Current on Buried Pipelines', *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1279, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12071279.
- [31] A. Mariscotti, D. Giordano, A. D. Femine, and D. Signorino, 'Filter Transients onboard DC Rolling Stock and Exploitation for the Estimate of the Line Impedance', in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, IEEE, May 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128903.
- [32] M. Schmucker, A. Reisch, and M. Haag, 'A Pipeline for Real-Time Synchronization of Relevant Data in Pediatric Emergencies', 2024. doi: 10.3233/SHTI240448.
- [33] J. Mc Hugh *et al.*, 'Diversity of dynamic voltage patterns in neuronal dendrites revealed by nanopipette electrophysiology', *Nanoscale*, vol. 15, no. 29, pp. 12245–12254, 2023, doi: 10.1039/D2NR03475A.
- [34] H. Cho, J. Kim, H. Jung, and H. Kim, 'Simultaneous DC Railway Power System Analysis Method Using Model-Based TPS', *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 6929, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12146929.
- [35] C. Yao, Q. Zhao, Z. Ma, W. Zhou, and T. Yao, 'Design and Simulation of an Intelligent Current Monitoring System for Urban Rail Transit', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 35973–35978, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975009.
- [36] A. Mariscotti, 'Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification', *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6610, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20226610.