

بررسی پتانسیل‌های سیستم‌های حمل و نقل ریلی در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر

مقاله علمی - پژوهشی

محمد محسن کبیری نصرآباد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

رشید تن‌زاده*، دانش آموخته پسا دکتري، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

فریدون مقدس‌نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rashidtanazadeh@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۴۰۸-۳۸۵

چکیده

سیستم حمل و نقل ریلی به عنوان منبعی در راستای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است. کاربرد مولد ترموالکتریک در آگزوز لکوموتیوها و در ساختار خطوط ریلی، نصب پنلهای خورشیدی و توربین‌های بادی کوچک با مشخصات هندسی منظم در سقف قطارها یا در مجاورت خطوط ریلی و اتصال پیزوالکتریک‌های جاذب ارتعاش و صوت بر روی خطوط ریلی و وسایل نقلیه ریلی، تأثیر چشمگیری در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از راه آهن داشته است. بررسی مطالعات پیشین نشان داده است که حداکثر توان انرژی تولیدشده توسط مولد ترموالکتریک به میزان ۲۰ میلی وات بر میلی متر مربع بوده است. در کاربرد همزمان، سلول‌های خورشیدی نصب شده با مساحت معادل ۳۴ مترمربع به ازای هر واگن روی سقف قطار ۱۵ واگنه و توربین‌های بادی با محور افقی و مساحت معادل ۰.۷۸۵ مترمربع به ازای هر واگن، حداکثر توان انرژی تولیدی به میزان ۳۱۱ کیلووات بوده که این مقدار تقریباً ۹ برابر توان تولیدی توربین‌های بادی نصب شده بر سقف قطار بوده است. مطابق نتایج، کاربرد همزمان توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی از نظر میزان توان انرژی تولید شده ارجحیت دارد.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل و نقل ریلی، تولید الکتریسیته، هوشمندسازی

۱ - مقدمه

کاهش هزینه‌های اقتصادی و حفظ محیط زیست است (Kuik, Branger, & Quirion, 2019). در این راستا، تلاش‌های گسترده در راستای تولید و کاربرد انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در سراسر جهان در حال اقدام است. همچنین همه‌گیری ویروس کوید ۱۹ و تأثیرات مخرب آن، پیش‌بینی‌های جهانی در حرکت به سمت تولید انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را به چالش کشانده است (Cozzi et al., 2020). میزان قابل توجهی از انرژی مصرفی در جهان به بخش حمل و نقل اختصاص یافته است. حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از سیستم‌های حمل و نقل، علاوه بر مصرف انرژی کمتر نسبت به سایر سیستم‌های حمل و نقلی،

سوخت‌های فسیلی از جمله زغال سنگ، نفت و گاز از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی در کشورهای مختلف دنیا است. مصرف سوخت‌های فسیلی باعث تغییرات آب و هوایی و تشکیل پدیده گرمایش جهانی شده است (Tasneem et al., 2020). امروزه با توجه به تولید و انتشار بالای دی‌اکسید کربن و آلودگی‌های زیست محیطی، استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان راه حل بلندمدتی در پایدارسازی انرژی در راستای تأمین نیاز جامعه بشری نبوده است (Johansson, Patwardhan, Nakićenović, & Gomez-Echeverri, 2012). انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، جایگزین مناسبی در راستای

انرژی خورشیدی مزایای زیادی دارد. تجهیزات آن ساده است و تجربه کافی در اکثر نقاط جهان برای برداشت انرژی، تعمیر و نگهداری‌های مورد نیاز وجود دارد (Long, Xia, Zhong, & Lu, & Yongga, 2021). معمولاً برای تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته از صفحات فتوولتائیک استفاده می‌شود. وو و همکاران در سال ۲۰۰۹ کارایی اقتصادی لامپ‌های ال ای دی خورشیدی در روشنایی جاده‌ها را مورد بررسی قرار دادند. لامپ‌های ال ای دی، مصرف انرژی بسیار کم‌تری نسبت به لامپ‌های جیوه‌ای (در حدود ۱/۴ لامپ‌های جیوه‌ای) داشته است بنابراین می‌توان از صفحات فتوولتائیک برای تأمین برق این لامپ‌ها استفاده کرد. ترکیب لامپ‌های ال ای دی و تجهیزات فتوولتائیک دارای هزینه اولیه بالاتری نسبت به لامپ‌های جیوه‌ای است اما مقایسه‌ی هزینه چرخه عمر ترکیب لامپ‌های ال ای دی و صفحات فتوولتائیک، هزینه کم‌تری نشان داده است (Wu, Huang, Huang, Tang, & Cheng, 2009). تولید انرژی در راه‌آهن از طریق نیروی باد امکان پذیر است. باد را می‌توان نشات گرفته از تابش خورشید دانست زیرا با تابش خورشید به دریاها و اقیانوس‌ها، اختلاف فشار لازم برای ایجاد باد ایجاد شده است. در توربین‌های بادی، انرژی ناشی از حرکت پرها منجر به تولید الکتریسیته شده است (Jugsujinda, & Seetawan, 2012). در این سیستم از توربین‌های بادی برای برداشت انرژی استفاده می‌شود (Kim, Kim, & Kim, 2021). سیندهوجا و همکاران در سال ۲۰۱۴ مدلی برای تولید انرژی با کاربرد توربین‌ها بادی مجرای مخروطی شکل روی سقف قطار ارائه دادند. این سیستم شامل یک دستگاه مکنده و فشرده سازی هوا بود که فشار هوای پشت توربین هنگام تغییر سرعت قطار قابل تنظیم بود. مدل ارائه شده شبیه سازی و مشخصات آن کنترل شد (Sindhuj, 2014). روش رایج دیگر در راستای تولید انرژی تجدیدپذیر در سیستم حمل و نقل ریلی، تولید انرژی با استفاده از صدا و ارتعاشات در راه‌آهن است (Gatti, Brennan, & Tehrani, & Thompson, 2016). انرژی تولید شده از این روش در راستای سیگنالینگ، تجهیزات سلامت خط راه‌آهن و ابزارهای کنترلی مورد استفاده قرار گرفته است (Hou et al., 2018). در این تحقیق دامنه وسیعی از اطلاعات مورد نیاز برای محققین و صنعت گران مورد بررسی قرار گرفت و طیف وسیعی از نیازمندی‌های کاوشگران در زمینه تولید انرژی‌های تجدید پذیر در حمل و نقل ریلی در راستای انتخاب بهترین شیوه تولید

می‌تواند به عنوان یکی از منابع تولید انرژی‌های تجدید پذیر در نظر گرفته شود (Jaffery et al., 2014). راه‌آهن پتانسیل بالایی در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر داشته و روش‌های گوناگونی برای برداشت و استفاده از این ظرفیت وجود داشته است. انرژی‌های تجدیدپذیر در راه‌آهن به روش‌های مختلفی از جمله استفاده از تجهیزات ترموالکتریک، جذب نور خورشید، توربین‌های بادی، پتانسیل ارتعاشات و صوت، قابل استحصال بوده است. در این تحقیق، اولین روشی که در راستای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفته است، روش ترموالکتریک است (Jibhkate, Joshi, & Nandanwar, 2013). واژه ترموالکتریک به معنی تولید انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی گرمایی است (Chuan, Wahid, Rahim, & Rahim, 2015). از آنجایی تقریباً تمام مادیات اطراف زندگی انسان می‌تواند از منابع تولید گرما به شمار آید، تولید انرژی به این روش، پتانسیل بالایی در راستای تحقیق و توسعه داشته است (Freer & Powell, 2020). ابتدا این روش در راه‌ها برای تولید انرژی تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته است. جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با طراحی مولد ترموموالکتریک جدید و با در نظر گرفتن شرایط هندسی و جوی مسیر راه، انرژی پاک به دست آوردند. در تحقیق آن‌ها تأثیر اختلاف دما در شبانه روز و فصول مختلف بر میزان انرژی الکتریکی تولیدی بررسی شد. حداکثر توان این مولد ترموالکتریک جدید طراحی شده در طول یک کیلومتری و عرض ۱۰ متری راه، ۲۰ کیلووات است. اگر انرژی مصرفی هرخانه را ۰.۲۵ کیلووات در نظر بگیریم، این روش با حداکثر توان خود، روشنایی ۸۰ منزل مسکونی را تأمین خواهد نمود. بنابراین ویجیانگ و همکاران گام ارزشمندی در جهت تولید انرژی تجدید پذیر از راه‌ها برداشتند (W. Jiang et al., 2017). یک روش ساده و مناسب در راستای برداشت انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از نور خورشید است (Tang, Hong, Jin, & Xuan, 2019). نور خورشید به اندازه کافی موجود است. در طول یک سال، خورشید در حدود $10^18 \times 1/5$ (کیلو وات ساعت) انرژی به زمین ارسال می‌کند. این مقدار انرژی خورشیدی ارسالی به زمین بسیار بیشتر از کل انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی و سایر منابع انرژی تجدید ناپذیر موجود در جهان است (Roy, Morency, Dugas, & Messaddeq, 2021). بنابراین خورشید را می‌توان از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی‌های تجدید پذیر دانست. برداشت

(Ji, 2020). از جمله مشکلات راه‌آهن شهری، ایجاد لرزش و صدای قابل لمس برای مردم اطراف خطوط ریلی است. از دیدگاه دیگر راه‌آهن شهری، فرصت مناسبی برای تولید انرژی پاک است. سیستم‌های ریلی شهری و حومه‌ای به پنج دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از سیستم مترو (Zhang, Zuo, Hu, Han, & Zhao, 2016)، قطار سبک شهری (Swanson & Thornes, 2010)، سیستم تراموا (Li, Yang, & Shi, 2013)، مونوریل (Seidenglanz, Chvátal, & Nedvedová, 2014) و سیستم راه‌آهن حومه‌ای (Falamarzi, Moridpour, Nazem, & Hesami, 2018). در جدول ۱ خصوصیات انواع سیستم‌های ریلی شهری و حومه‌ای ارائه شده است. محدوده‌ی حمل و نقل ریلی شهری محل مناسبی برای تولید انرژی از باد، نورخورشید (برای سیستم‌های سطحی)، ارتعاشات و صوت ناشی از حرکت قطارها است. در مناطق شهری قیمت زمین غالباً بالاتر از مناطق حومه شهری است و صدا و لرزش ناشی از حرکت قطار برای ساکنین شهری آزاردهنده است بنابراین استفاده بهینه از این مناطق باید در دستور کار شهرداری‌ها قرار گیرد. برای مثال سیسکارلی و همکاران با استفاده از ایستگاه‌های خورشیدی در محدوده عبور تراموا در دو نقطه شهری موفق به تولید انرژی شدند (Ciccarelli, Di Noia, & Rizzo, 2018).

انرژی، ارائه شده است. این تحقیق به عنوان یک مرجع علمی در راستای حذف سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی‌های تجدید پذیر در هوشمندسازی سیستم حمل و نقل ریلی ارائه شده است.

۲- راه‌آهن و انواع سیستم‌های حمل و نقل ریلی

شهرها مراکز اقتصادی و محل شکل‌گیری ارتباطات بوده و وجود یک سیستم ارتباطی ریلی هوشمند بین بخش‌های مختلف شهر از مزوومات پیشرفت آن به حساب می‌آید. بدیهی است به هر میزان توانایی برقراری ارتباط از یک نقطه شهر به نقطه‌ای دیگر آن، سریع‌تر و ایمن‌تر باشد آن شهر پیشرفته‌تر است (Asensio, 2000). در شهرهای که پل‌های ارتباطی بین مرکز اصلی جمعیتی و حومه شهری توسط سیستم حمل و نقل ریلی تأمین شده باشد، استفاده از وسایل نقلیه شخصی کاهش یافته و در مجموع هزینه‌های وارد شده به جامعه کاهش می‌یابد (Zheng & Cao, 2021). به دلیل اهمیت ایجاد حمل و نقل شهری متناسب با محیط شهری، تمرکز کشورهای مختلف بر روی حمل و نقل ریلی شهری است (ju Kim, young, Jeong, wook Kim, & kyung Oh, 2016). حمل و نقل ریلی شهری به دسته‌ای از حمل و نقل اطلاق می‌شود که خدمات مسافری به وسیله قطارهای درون شهری یا حومه‌ای انجام می‌شود. حمل و نقل ریلی شهری یکی از مهم‌ترین سیستم‌ها در جذب مسافر است (F. Zhou, Song, Xu, &)

جدول ۱. مشخصات انواع سیستم‌های حمل و نقل ریلی شهری و حومه‌ای

| نحوه‌ی احداث | توانایی حمل مسافر دریک جهت در ساعت/تعداد | سرعت متوسط بهره‌برداری (کیلومتر بر ساعت) | تعداد متداول واگن‌ها | پیدایش | سیستم |
|---------------------------|--|--|----------------------|-------------------|-----------------|
| زیرزمینی | ۴۰۰۰۰ | ۴۰-۳۵ | ۵< | ۱۸۶۳ (لندن) | مترو |
| همسطح | ۳۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ | ۸۰-۷۰ | ۳< | ۱۹۸۰ | قطار سبک شهری |
| همسطح | ۱۰۰۰۰-۳۰۰۰ | ۳۰-۱۰ | ۳-۲ | ۱۸۳۲ (نیویورک) | تراموا |
| زیرزمینی، همسطح، بالاسطحی | ۱۴۰۰۰ | ۳۵-۳۰ | ۳< | ۱۸۷۶ (فیلا دلفیا) | مونوریل |
| همسطح | ۸۰۰۰۰-۴۰۰۰۰ | ۷۰-۵۰ | ۶< | - | راه‌آهن حومه‌ای |

مورد نیاز بود که مراکز شهری مهم را به یکدیگر متصل نماید و به سیستم ریلی بین شهری با سرعت کمتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت مشهور شد (Lixin & Fengli, 2017). امروزه با پیشرفت علم و فناوری، سیستم‌های حمل و نقل ریلی جدید تحت عنوان قطارهای سریع‌السیر ایجاد شد. در آیین نامه‌های مختلف تعاریف متفاوتی از این سیستم ارائه شده است. برای مثال در برخی از آیین نامه‌ها، سرعت بالای ۲۰۰ کیلومتر

علاوه بر سیستم ریلی شهری و حومه‌ای، سیستم‌های ریلی بین شهری و سریع‌السیر نیز برای ارتباطات بین شهری ایجاد شده است (W. Zhou, Tian, Deng, & Qin, 2015). با افزایش جمعیت و پیشرفت شهرها و توسعه ارتباطات گسترده، سریع و ایمن بین شهرهای مختلف، نیاز به ایجاد زیرساخت‌های قوی برای حمل و نقل بین شهری ظاهر شد (Yao & Jiang, 2014). بنابراین سیستم حمل و نقل ریلی بین شهری ویژه‌ای

برساعت را مبنای طبقه‌بندی قطارهای سریع السیر دانسته‌اند (de Fer, 2010). کشور چین پیشرو در طراحی و ساخت راه‌آهن سریع السیر است. علاوه بر چین کشورهای نظیر ایالات متحده آمریکا، برزیل، تایلند، استرالیا و ویتنام نیز در حال طراحی، ساخت و گسترش راه‌آهن سریع السیر خود هستند (C. Chen & Jiang, 2014). راه‌آهن سریع السیر پتانسیل بالایی برای تولید انرژی تجدید پذیر دارد. در جدول ۲، انواع سیستم‌های ریلی بین شهری و ویژگی‌های آن بیان شده است (Maxwell, 1999; Yu, Lin, Tang, & Zhong, 2019).

جدول ۲. مشخصات انواع سیستم‌های حمل و نقل ریلی بین شهری و سریع السیر

| سیستم | پیدایش | طول خط (کیلومتر) | سرعت متوسط بهره برداری (کیلومتر بر ساعت) | میانگین طول سفر (کیلومتر) | فاصله ایستگاه‌ها |
|--|--------------|------------------|--|---------------------------|------------------|
| سیستم‌های ریلی بین شهری با سرعت معمولی | ۱۹۳۰ | ۲۵۰ < | ۱۳۰-۹۰ | ۱۰۰ < | ۳۰-۱۰۰ |
| سیستم‌های ریلی سریع السیر | ۱۹۳۸ (میلان) | ۴۰۰ < | ۲۰۰ < | ۱۵۰ < | ۲۰۰-۱۰۰ |

با هدف حمل و نقل مسافران طراحی شده است. وسایل نقلیه ریلی کشنده به دو دسته اصلی تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از واگن‌های خود کشش و لوکوموتیوها. برای کنترل وضعیت سلامت و پایش وسایل نقلیه ریلی و مکان‌یابی قطار نیاز از ابزارهای پایش جی پی اس استفاده شده است و این ابزار برای فعالیت دائم نیاز به انرژی دارد. بیشترین مشکل تأمین انرژی در واگن‌های باری وجود دارد. با نصب صفحات فتوولتائیک و توربین‌های بادی به صورت جداگانه یا ترکیبی روی سقف قطارها، میتوان انرژی الکتریکی تولید کرد. برداشت کننده‌های الکترومغناطیس نیز می‌تواند نیاز به باتری‌ها را در قطارهای سریع السیر برطرف سازد (Jin et al., 2017). همچنین با نصب پیرو الکتریک‌ها روی بوژی‌ها می‌توان انرژی ارتعاشی تلف شده را به الکتریسیته تبدیل کرد (Ortiz et al., 2014). استفاده از روش الکتریسیته مالشی نیز نوع دیگری از برداشت انرژی دروسایل نقلیه ریلی است (Jin et al., 2017).

۳- معرفی بخش‌های مختلف سیستم حمل و نقل ریلی

امروزه با افزایش جمعیت و نیاز به گسترش سیستم حمل و نقل ریلی، بخش‌های به هم پیوسته‌ای برای مدیریت این سیستم در راستای افزایش بهره وری آن ایجاد شده است. در مجموع برای تشکیل یک سیستم ریلی کارآمد لازم است تا بخش‌های مختلف آن برای هدفی واحد یعنی حمل و نقل راحت، سریع و ایمن با حجم بالا، هماهنگ باشند (Nerişanu & Drăgan, 2017). علاوه بر آن تلاش کشورها جهت تأمین انرژی مورد نیاز راه‌آهن با منابع تجدیدپذیر، ضرورت توجه بیشتر به کارایی این بخش را افزایش داده است.

۳-۱- بخش ماشین‌های ریلی راه‌آهن

ماشین‌های ریلی حمل و نقل ریلی شامل ناوگانی است که به طور مستقیم با بار یا مسافر در ارتباط است. وسایل نقلیه ریلی در مجموع به سه دسته کلی شامل وسایل نقلیه کشنده (Ma, Lei, Ren, & Mu, 2015). حمل بار (J. Chen, Yao, & Li, 2013) و حمل مسافر (Park & Kim, 2016) تقسیم بندی شده است. وسایل نقلیه ریلی کشنده به وسایلی گفته می‌شود که دارای موتور و یا محرک بوده و نیروی لازم برای حمل سایر وسایل نقلیه ریلی را فراهم می‌کنند. وسایل نقلیه ریلی حمل بار شامل وسایلی هستند که هدف از آن‌ها جابجایی بار اعم از کالاهای مختلف نظیر مواد سوختی، مواد غذایی و مواد معدنی است. وسایل نقلیه ریلی حمل مسافر، وسایل نقلیه‌ای هستند که

۳-۲- بخش زیرساخت راه‌آهن

قطار برای حرکت، نیاز به مسیری صاف و هموار دارد (Kaewunruen, Aikawa, & Remennikov, 2019). تأمین بستری مناسب برای عبور وسیله نقلیه ریلی توسط بخش زیرساخت راه آهن قابل انجام است. زیرساخت راه‌آهن از دو بخش روسازی (Ižvolt, Ižvoltová, & Šestáková, 2014) و زیرسازی (Ebrahimi, Tinjum, & Edil, 2014)

دامنه‌ی ارتعاش ریل در اثر عبور قطار با توجه به پارامترهایی مانند میزان بار، سرعت قطار، نوع زیرسازی، ریل و تراورس‌ها می‌تواند از ۱۲ تا ۱۳ میلیمتر متغیر باشد (Lin, Pan, Chen, & Zuo, 2018). دستگاه‌های برداشت انرژی مبتنی بر تبدیل کرنش به انرژی را می‌توان بر بالا و یا زیر تراورس‌ها نصب کرد (Tianchen, Jian, Ruigang, & Xiaowei, 2014). همچنین دستگاه‌های برداشت صوت که در کنار خط ریلی نصب می‌شود، می‌تواند انرژی صوت را به الکتریسیته تبدیل کند (Panahi & Younesian, 2020).

۳-۳- بخش بهره برداری راه‌آهن

این بخش به اهداف و سیستم‌های بهره برداری از راه‌آهن می‌پردازد. از جمله دلایل ایجاد این بخش می‌توان به حداقل کردن زمان حمل و نقل، حداقل کردن هزینه‌های حمل و نقل و کاهش عوارض محیط زیستی راه‌آهن اشاره کرد (Yin, Ke, Yan, Lu, & Xu, 2020). بهره‌برداری راه‌آهن به مجموعه خدمات و فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که در آن شرکت‌های وابسته به راه‌آهن به خدمت‌دهی و کسب درآمد از راه‌آهن مشغول هستند. بهره برداری در راه‌آهن به سه دسته فنی، تجاری و تعمیر و نگهداری تقسیم شده است. بخش فنی شامل مواردی چون برنامه ریزی عبور و مرور، ایجاد قوانین و مقررات لازم، تنظیم و کنترل ترافیک، ایمنی سیر حرکت و تخصیص ظرفیت است. بخش تجاری شامل سازماندهی، مدیریت بار، مسافر، تنظیمات و محاسبات مربوط به قیمت‌ها است. بخش عملیات تعمیر و نگهداری شامل تأمین زیر ساخت‌ها و وسایل نقلیه مناسب و استاندارد و سایر تجهیزات مورد نیاز راه‌آهن است (Pyrgidis, 2021). به هر میزان که فعالیت حرکتی قطارها افزایش یابد، مجموع انرژی تولیدی توسط وسیله‌ی نقلیه ریلی افزایش می‌یابد. همچنین میزان برداشت انرژی از تجهیزات خط ریلی که وابسته به حرکت قطار است در اثر استفاده از ظرفیت حداکثری عبور و مرور خطوط ریلی افزایش می‌یابد. بنابراین بدیهی است استفاده حداکثری از ظرفیت حرکت، خطوط و برنامه‌ریزی دقیق حرکت قطارها، می‌تواند تولید انرژی تجدید پذیر را به حداکثر مقدار ممکن برساند.

تشکیل شده است. روسازی‌ها به دو بخش روسازی‌های بالاستی (Javad Sadeghi, Hasheminezhad, & Essmayil Kaboli, 2015) و روسازی‌های بدون بالاست (Ižvolt & Šmalo, 2014) تقسیم بندی می‌شوند. وظایف اصلی لایه بالاست تحمل و توزیع تنش‌ها (Ferestade, Tehrani, & Heidary, 2017)، ایجاد پایداری لازم برای خط ریلی (J Sadeghi, Najar, Zakeri, & Kuttelwascher, 2019)، کاهش ارتعاشات، انعطاف‌پذیری مناسب و همچنین عبور دادن آب‌های خارجی وارد شده به خط ریلی است (Fathali, Chalabii, Astaraki, & Esmaeili, 2021). بیشترین هزینه تعمیر نگهداری در خطوط بالاستی مربوط به بالاست است (JM Sadeghi, Zakeri, & Najar, 2016). خطوط بالاستی در دنیا شناخته شده تر و مورد استفاده بیشتری قرار گرفته است. درمدلسازی‌ها غالباً لایه بالاست را به صورت فنرهای کشسان شبیه سازی می‌کنند. این موضوع می‌تواند افق‌های جدیدی را در راستای تحقیقات مرتبط با تولید انرژی از حرکت ارتجاعی بالاست در هنگام حرکت قطار، ارائه دهد (Alabbasi & Hussein, 2021). در حال حاضر در بسیاری از کشورها، خطوط بدون بالاست در حال گسترش است. دلیل اصلی گسترش خطوط بدون بالاست، هزینه‌های تعمیر و نگهداری بالای خطوط دارای بالاست است. همچنین با افزایش سرعت قطار، پایداری خط که غالباً توسط بالاست تأمین می‌شود، کاهش یافته و این مطلب می‌تواند مشکلات زیادی را برای ایمنی قطار ایجاد کند. در خطوط بدون بالاست ارتفاع روسازی کاهش یافته و زیرساخت می‌تواند فضای مجاز عبوری (گاباری) بیشتری را نسبت به خطوط دارای بالاست تأمین کند. خطوط بالاستی قابل بازیافت بوده و هزینه اولیه کم‌تری برای ساخت نیاز داشته است. همچنین وجود لایه بالاستی می‌تواند صدا و ارتعاشات را میرا کند (Köllő, Puskás, & Köllő, 2015). نصب دستگاه ترموالکتریک، پنل‌های خورشیدی روی تراورس‌ها، توربین‌های بادی کنار و داخل خط، از روش‌های تولید انرژی‌های تجدید پذیر با توجه به پتانسیل زیرساخت خطوط ریلی است. حرکت قطار به میزان قابل توجهی در خط ریلی نوسان و ارتعاش ایجاد می‌کند و می‌تواند منبع خوبی برای برداشت انرژی باشد. به دلیل سادگی نصب و بیشینه بودن ارتعاشات، دستگاه‌های برداشت انرژی غالباً به ریل‌ها و تراورس‌ها نصب شده است. با حرکت قطار بر روی ریل، تغییر شکل قائم در ریل‌ها ایجاد می‌شود.

۴- تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در راه‌آهن

پتانسیل‌های مهمی در زمینه تولید انرژی تجدیدپذیر وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به اختلاف دما، تابش نور خورشید، جریان باد، ارتعاشات، و صداهای تولید شده در خطوط راه‌آهن اشاره کرد. در روش ترموالکتریک از تفاوت دما بین دو نقطه به عنوان منبع اصلی انرژی استفاده می‌شود. در این روش، به دنبال دو نقطه با بیشترین اختلاف دمایی هستیم زیرا میزان تولید انرژی مستقیماً به اختلاف دما وابسته است. روش‌های تولید انرژی از نور خورشید نیز متنوع است؛ از جمله آن‌ها صفحات فتوولتائیک ثابت و متحرک می‌باشد. صفحات فتوولتائیک ثابت در مکان‌های ثابت نظیر ایستگاه‌ها یا روی تراورس‌های خط ریلی نصب می‌شوند و از جایی به جای دیگر حرکت نمی‌کنند. اما صفحات فتوولتائیک متحرک بر روی وسایل نقلیه ریلی نصب می‌شوند و همراه با آن‌ها در حرکت هستند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۴ در برن سوئیس، اولین پنل خورشیدی از نوع ثابت بر روی تراورس‌های خط ریلی نصب شد. در سال ۲۰۱۸ نیز با بهره‌گیری از تجارب گذشته، پنل‌های خورشیدی به توان ۱۰۰۰ مگاوات انرژی در خطی به طول ۱۰۰۰ کیلومتر در کشور آلمان روی تراورس‌ها نصب شد. گیریش و همکاران، تحقیقاتی در راستای طراحی قطاری بر پایه تأمین انرژی حرکتی خود از صفحات فتوولتائیک، انجام دادند. هدف این تحقیق اندازه‌گیری میزان سوخت فسیلی مورد استفاده قطار و جایگزینی آن با انرژی خورشیدی بوده است. طبق این تحقیق توان مصرفی حرکتی قطار به طور متوسط ۸٫۲ کیلووات بر کیلومتر است. اگر قطار با سرعت متوسط ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت حرکت کند، در هر ساعت معادل ۸۲۰ کیلو وات ساعت (معادل ۰٫۸۲ مگاوات ساعت) انرژی مصرف می‌کند. همچنین نصب پنل‌های ۳۰۰ وات روی سقف قطار، حداکثر می‌تواند ۱٫۹۸ مگاوات توان انرژی تولید کند. بنابراین در حدود ۴۱ درصد از انرژی تولید شده می‌تواند برای حرکت قطار کافی باشد و مابقی در باتری ذخیره می‌شود (GirishK.G). در روش تولید انرژی بادی، تولید انرژی بر پایه حرکت توربین‌های بادی استوار است. این روش می‌تواند ثابت یا متحرک باشد. اگر توربین‌های بادی در محلی بی‌حرکت استقرار یابد (برای مثال در کنار خط مجاور تونل‌ها یا داخل خط بین دوریل) به آن ثابت می‌گویند و اگر توربین‌های بادی بر روی سقف قطارها نصب و بر اثر حرکت قطار و ایجاد باد انرژی تولید کند، به آن روش

متحرک تولید انرژی بادی گویند. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۵، تولید انرژی از توربین‌های بادی نصب شده در کنار خط ریلی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، کومار و همکارانش با طراحی خاص توربین‌ها موفق به برداشت توان ۴۰۰ تا ۶۰۰ وات انرژی شدند که می‌تواند برای روشن کردن حدود ۲۰۰ ماژول ال ای دی ۳ وات کافی باشد (Kumar, Karandikar, & Chavan, 2015). گوپتا و همکاران در سال ۲۰۱۶ توربین نصب شده بر روی لوکوموتیو را مدل‌سازی کردند و توربین ولز را به این منظور پیشنهاد کردند. بدین ترتیب هر لوکوموتیو توانست ۲٫۹۴ کیلووات ساعت انرژی تولید کند. همین امر باعث شد تا ۹۸ درصد در مصرف سوخت فسیلی صرفه جویی شود و گام مهمی در جهات کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و حفاظت از محیط زیست برداشته شود (Gupta, Kaushik, Mathur, Pal, & Bhatnagar, 2016). تحقیقات جدید، روش‌های ترکیبی نوینی را پیشنهاد داده است. برای مثال ترکیبی از روش تولید انرژی با صفحات فتوولتائیک و توربین‌های بادی بر روی قطار مورد توجه قرار گرفته است که انرژی نسبتاً بیشتری در مقایسه با کاربرد آن‌ها به صورت جداگانه تولید می‌کند. روش دیگر، تولید انرژی بر پایه تولید انرژی از ارتعاشات و صدای راه‌آهن است. ریل قطار در اثر حرکت قطار، دچار افت و خیز شده که از آن به عنوان ارتعاش یاد می‌شود و می‌تواند به عنوان یکی از منابع تولید انرژی در نظر گرفته شود. علاوه بر آن سایر نقاط روسازی و زیرسازی نیز قابلیت برداشت انرژی دارند. برای مثال دال‌های شناور یا زیرسازی نیز قابلیت برداشت انرژی دارد. علاوه بر ارتعاشات، صدای وسایل نقلیه ریلی نیز می‌تواند منبعی برای تولید انرژی باشد. در مجموع سه منبع اصلی ارتعاش در راه‌آهن وجود دارد که عبارتند از خط ریلی، وسیله نقلیه ریلی و پل راه‌آهن. بنابراین دستگاه‌های برداشت انرژی نیز یا در طول خط ریلی ثابت شده‌اند یا روی وسیله نقلیه ریلی سوار شده است و یا بر روی پل‌ها قرار دارند (Uljanov, Hadaš, Hyde, & Smilek, 2020). دستگاه‌های برداشت انرژی از این روش شامل انواع ابزارهای الکترومغناطیس، پیزوالکتریک و الکتروسیسته مالشی است. روش دیگر تولید انرژی با استفاده از صدای راه‌آهن و دستگاه‌های برداشت انرژی آکوستیک است. نلسون و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش الکترومغناطیس که منبع تولید آن خطوط ریلی است توانستند ۰٫۱۴۶ میلی وات توان انرژی

انرژی پایدار است. ساختار زیرساخت راه آهن، شامل لایه های مختلف با دماهای متفاوت است که با در نظر گرفتن ویژگی های متفاوت مصالح و ضریب انتقال حرارتی آنها، قابلیت تبدیل به یک منبع قابل توجه از انرژی را دارد. معمولاً برای استفاده از این روش، از مولد ترموالکتریک استفاده شده که مطابق شکل شماره ۱، در زیر ریل ها و در محلی بین دو تراورس، نصب می شود. محاسبه ولتاژ تولید شده از مولد ترموالکتریک، با استفاده از رابطه ۱، انجام می شود.

$$V = N(0/0002 \times 1/004^{\Delta T}) \times \Delta T \quad (1)$$

تا ۴ حاصل می شود. در این روابط V برابر ولتاژ تولید شده برحسب ولت، توسط مولد ترموالکتریک است. P_0 ، V_0 ، R_0 ، R_i ، I_0 به ترتیب معادل ولتاژ خروجی برحسب ولت (V)، مقاومت خارجی برحسب اهم (Ω)، مقاومت داخلی برحسب اهم (Ω)، جریان خروجی برحسب آمپر (A) و توان خروجی برحسب وات (W) است.

$$V_0 = \frac{V \cdot R_0}{(R_0 + R_i)}$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0}$$

$$P_0 = V_0 \times I_0 = R_0 \times I_0^2 = \frac{V_0^2}{R_0} \quad (4)$$

تولید کنند (Nelson, Platt, Albrecht,) (Kamarajugadda, & Fateh, 2008). دی پاسکال و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از پیزو الکتریک نصب شده روی بوژی، موفق به تولید ۱۰۰ میکرووات توان انرژی شدند (De Pasquale, Somà, & Fraccarollo, 2012).

۴-۱- تولید انرژی تجدیدپذیر به وسیله ترموالکتریک

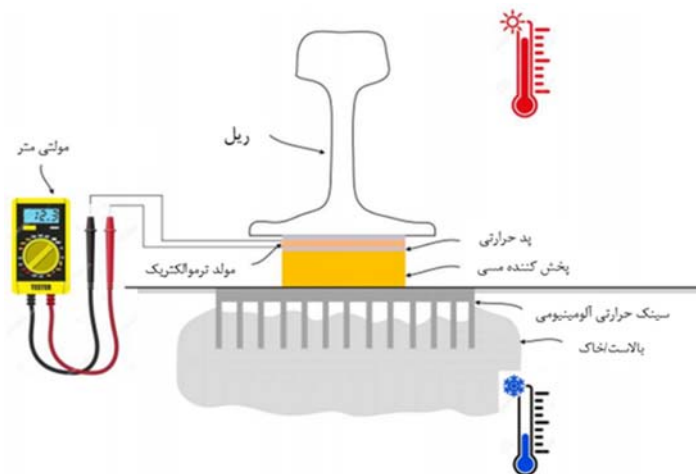
روش استخراج انرژی از تفاوت دما یا ترموالکتریک، یک روش موثر برای بهره گیری از پتانسیل های راه آهن به منظور تولید

در این رابطه مقدار ΔT اختلاف دمای دو سطح مورد نظر برحسب کلوین است. N تعداد کل عناصر ترموالکتریک است که مولد ترموالکتریک را تشکیل داده است. V برابر ولتاژ تولید شده برحسب ولت، توسط مولد ترموالکتریک است. اگر مولد ترموالکتریک دارای مقاومت خارجی و داخلی باشد، مقدار ولتاژ خروجی، جریان خروجی و توان خروجی به ترتیب از روابط ۲

(۲)

(۳)

(۴)



شکل ۱. محل قرارگیری دستگاه تولید انرژی الکتریکی از خط ریلی و اجزای آن (Mingyuan Gao et al., 2019)

۴-۲- تولید انرژی تجدیدپذیر به وسیله نور خورشید

سیستم خورشیدی از جمله سیستم‌های تولید انرژی پاک در مدهای مختلف حمل و نقل به خصوص حمل و نقل ریلی است. البته این سیستم در مناطقی، کارایی دارد که روزهای خورشیدی زیادی داشته باشند. صفحات فتولتائیک، نور و انرژی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. از مزایای صفحات فتولتائیک می‌توان به وزن پایین، مقرون به صرفه بودن و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر اشاره کرد (L. Zhu, Xu, & Pan, 2019). تجربه نشان داده است که کارایی صفحات فتولتائیک معمولاً کمتر از ۳۰ درصد است. انتقال الکترون در یک فرایند برهم کنشی در ماده نیمه رسانایی مانند سیلیکون، عامل ایجاد اختلاف پتانسیل است (سیلیکون، ماده اصلی تشکیل دهنده صفحات فتولتائیک است) (Bosso, Magelli, & Zampieri, 2021). توان تولیدی از صفحات فتولتائیک مطابق روابط ۵ و ۶ قابل محاسبه است (Ingole & Rakhonde, 2015). طرح تئوری جریان تولید شده در این صفحات با در نظر گرفتن قوانین گره و تک دیود مدار معادل آن ارایه می‌شود (Y. Jiang, Qahouq, & Batarseh, 2010). مقدار جریان منبع رابطه مستقیم با نور تابیده شده به سلول فتولتائیک دارد و به صورت خطی با نور تغییر می‌کند (Walker, 2001). صفحات فتولتائیک می‌تواند بر روی قطار (Vasisht, Vashista, Srinivasan, & Ramasesha, 2017) یا بر روی خط ریلی و یا در ایستگاه‌ها نصب شوند (Senda & Makino, 1996).

نصب مولد ترموالکتریک روی بخش‌های مختلف وسایل نقلیه ریلی از جمله محور بوژی‌ها و محل خروج گازهای حاصل از احتراق سوخت نیز از روش‌های رایج برای تولید انرژی است که به نظر می‌رسد گستردگی بیشتری نسبت به تولید انرژی از خط ریلی داشته باشد. گازها پتانسیل بالاتری نسبت به بقیه حالات ماده جهت جذب گرما داشته و تولید انرژی پاک ناشی از اختلاف دمای گاز ناشی از احتراق با دمای محیط بیرون، مورد توجه محققین قرار گرفته است. در قطارها معمولاً واحد احتراق سوخت و تولید انرژی در لوکوموتیو قرار دارد. بسیاری از انرژی مصرفی توسط قطارها به صورت حرارتی تلف می‌شود. به منظور بهره‌گیری از انرژی موجود در گاز خروجی لوکوموتیوهای دیزل الکتریک، روشی بر اساس استفاده از مولد ترموالکتریک توسعه یافته است. محل نصب و ابعاد هندسی این مولد نیاز به بهینه‌سازی دارد. هرچه اختلاف دما بین دو سطح مولد ترموالکتریک بیشتر باشد، توان تولید انرژی بیشتر خواهد بود؛ اما باید توجه داشت که افزایش بیش از حد اختلاف دما، ممکن است منجر به ناکارآمدی و کاهش عمر مولد شود. هر مولد ترموالکتریک دارای یک سمت گرم و یک سمت سرد است که با سیستم خنک‌کننده موتور مرتبط است. هر مولد ترموالکتریک از اجزای کوچک‌تری به نام ماژول ترموالکتریک تشکیل شده است.

$$E_{ff}(pv) = H \times PR \quad (5)$$

$$P_S = Ins(t) \times A_S \times E_{ff}(pv) \quad (6)$$

خورشیدی تولید می‌شود. این جریان نوری متناسب با مقاومت بار و شدت تابش، بین مقاومت متغیر دیود و بار، تقسیم می‌شود. واسیشت و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی عملکرد ماژول‌های فتولتائیک نصب شده بر روی سقف قطارها پرداختند. در این تحقیق، دو واحد از ماژول‌های فتولتائیک با توان حداقل ۱۲۰ کیلووات بر ساعت برای هر واگن قرار داده شد. تخمین زده شده است که یک واگن مجهز به ماژول‌های فتولتائیک ۱۹۰ وات، می‌تواند به طور متوسط ۱۸ کیلووات ساعت انرژی تولید کند. اگر همه واگن‌های قطارهای هند به دو ماژول فتولتائیک ۱۹۰ وات مجهز شوند، حدود ۱۰۸/۵ میلیون لیتر گازوئیل در سال صرفه‌جویی خواهد شد.

در رابطه ۵ H ، PR و $E_{ff}(pv)$ به ترتیب نسبت تابش روزانه به صفحات فتولتائیک، بازده تابشی فتولتائیک و ضریب کاهشی توان حداکثر است. همچنین در رابطه ۶، $Ins(t)$ حداکثر توان تولیدی انرژی واحد سطح فتولتائیک به وات بر متر مربع وابسته به زمان، A_S مساحت صفحات فتولتائیک مورد استفاده و P_S توان انرژی تولیدی توسط صفحات فتولتائیک به وات است. صفحات فتولتائیک می‌تواند به صورت یک منبع جریان موازی با یک دیود مدل سازی شوند. زمانی که هیچ نوری برای تولید جریان وجود ندارد، سلول خورشیدی به عنوان یک دیود عمل می‌کند. هنگامی که شدت نور تابیده به سلول افزایش می‌یابد، جریانی متناسب با شدت نور ورودی توسط سلول

با یک مکانیزم مشخص الکترونیسته تولید گردد. مشخص است که هرچه سرعت قطار عبوری بیشتر باشد میزان انرژی تولید شده به وسیله توربین‌های بادی بیشتر است؛ بنابراین روش بادی تولید انرژی تجدیدپذیر برای قطارهای سریع السیر می‌تواند انرژی لازم برای روشنایی ایستگاه‌های راه‌آهن و حتی خانه‌های اطراف راه‌آهن را فراهم کند. اگر توربین‌ها در کنار ریل قرار بگیرند، با حرکت و سرعت گرفتن قطار براساس معادله برنولی فشار هوای سطح خارجی قطار کاهش پیدا می‌کند و از آن جاییکه که هوای پرفشار به سمت مناطق با فشار کم حرکت می‌کند، باد ایجاد شده که می‌تواند منبع تولید انرژی باشد. اگر توربین‌های تولید انرژی بر سقف قطار نصب شوند، انرژی تولید شده می‌تواند برای مصرف خود قطار مورد استفاده قرارگیرد و هم چنین مقداری از آن ذخیره شود. روش‌های نو آورانه‌ای برای تولید انرژی با استفاده از وسایل حمل و نقل ریلی وجود دارد. این روش‌ها مبتنی بر اتصال توربین‌های بادی به وسیله نقلیه ریلی است (Sathish, Subramanian, Muthukumar, & Karthick, 2020). برای مثال استفاده از توربین‌های نسل جدید که به هنگام حرکت طبیعی هوا به حرکت در نیامده اما با جریان باد حرکت کرده و انرژی تولید می‌کنند. از روش‌های دیگر استفاده از توربین‌های بادی در مجاورت تونل‌ها به خصوص تونل‌های مربوط به قطارهای سریع السیر است (He et al., 2018). مطابق شکل ۲، دو نوع معمول توربین بادی جهت تولید الکترونیسته عبارت است از توربین‌های بادی با محور عمودی و توربین‌های بادی با محور افقی (Johari, Jalil, & Shariff, 2018).

(Vasisht et al., 2017). راسلی و همکاران در سال ۲۰۱۷ تحقیقی را در رابطه با تأمین و یکپارچه سازی سیستم برق قطارها با دیدگاه کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای انجام دادند. تحقیقات نشان داده است که با کاربرد مبدل‌های کوچک و جداسازی ماژول‌های فتوولتائیک، محدودیت‌های گذشته در تولید انرژی با استفاده از صفحات فتوولتائیک برطرف شده است (Ruscelli, Cecchetti, & Castoldi, 2017). در استرالیا با نصب صفحات خورشیدی نصب شده بر روی سقف قطار، ۷۷ کیلووات ساعت انرژی در باتری‌های مخصوص ذخیره شده است (Cooke, 2017). تولید انرژی با استفاده از قراردادان صفحات خورشیدی بر روی تراورس‌ها نیز امکان پذیر است که به صورت پروژه‌های تحقیقاتی در کشورهایی چون ایتالیا، فرانسه و بریتانیا انجام شده است (Berti, 2019). اخیراً در کشورهای زیادی، به نصب صفحات خورشیدی در مناطقی از ایستگاه‌ها توجه شده است. این محل‌ها غالباً در نقاطی از ایستگاه است که ارتفاع بالاتری نسبت به نقاط اطراف داشته تا نور خورشید به طور کامل و بدون مانع به آن بتابد (NEWS, 2019). خروجی اقدامات و تحقیقات انجام شده در زمینه تولید انرژی خورشیدی در راه‌آهن در جدول ۳ بیان شده است.

۴-۳- تولید انرژی تجدیدپذیر به وسیله باد

روش‌های مختلفی در راستای تولید انرژی‌های تجدید پذیر به وسیله باد در راه‌آهن وجود دارد. یکی از این روش‌ها این است که توربین‌های بادی را به موازات خطوط ریلی نصب کنیم تا در هنگام عبور قطار و ایجاد اختلاف فشار در اطراف توربین،

جدول ۳. خروجی تحقیقات انجام شده برای تولید انرژی با استفاده از صفحات فتوولتائیک و جزئیات آن

| مرجع | اختلاف پتانسیل تولیدی (ولت) | مقدار توان تولیدی هر جزء (میلی وات) | مساحت صفحات (میلی‌متر مربع) | محل برداشت انرژی خورشیدی |
|--|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| (Vasisht et al., 2017) | | (حداکثر) ۱۹۰۰۰۰ | | پنل‌های روی سقف وسیله نقلیه ریلی |
| (Ciccirelli et al., 2018) | ۳۶,۲ | ۲۱۲۰۰۰ | | پنل‌های نصب شده در کنار مسیر عبور تراموا |
| (Hayashiya et al., 2012) | | (حداکثر) ۱۱۸۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰۰ | پنل‌های نصب شده در ایستگاه |
| (Bischoff, Meyer, Enochsson, Feltrin, & Elfgren, 2009) | ۱۲ | (میانگین) ۴۵۰۰ | | خط ریلی بروی پل |
| (Bulbul, Laskar, Chy, & Sahariyat, 2017) | | ۳۴۵۰۰۰ | ۱۶۰۱۶۰۰ | پنل‌های روی سقف وسیله نقلیه ریلی |
| (Darshana, Karnataki, Shankar, & Sheela, 2015) | ۲۴ | (حداکثر) ۳۸۰۰۰۰ | ۱۸۷۵۰۰۰ | پنل‌های روی سقف وسیله نقلیه ریلی |
| (GirishK.G) | | ۳۰۰۰۰۰ | ۱۷۹۷۹۰۰ | پنل‌های روی سقف وسیله نقلیه ریلی |



ب



الف

شکل ۲. الف) توربین بادی با محور عمودی ب) توربین بادی با محور افقی

را به شبکه قدرت یا محل ذخیره‌سازی می‌رساند. توربین‌های بادی با محور افقی دارای چند عنصر کلیدی بوده که بهره‌وری را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال، موتور انحراف دهنده پره‌ها باعث می‌شود که پره‌ها همواره به سمت باد به چرخش درآیند. همچنین، توربین دارای سیستم ترمزی است که در مواجهه با بادهای شدید، توربین را به استراحت می‌نشانند تا از صدمات به اجزا جلوگیری شود. از مزایای این نوع توربین‌ها، پایداری بالا است که از تراز بودن پره‌ها نسبت به مرکز گرانث توربین ناشی شده است (Wright & Wood, 2004; Xu & Sankar, 2000). برای محاسبه توان تولید شده توسط توربین‌هایی که به صورت ثابت در کنار خط ریلی نصب شده‌اند، ابتدا توان توده باد در حرکت محاسبه می‌شود. میزان توان توده‌ای از هوا که در حال حرکت است مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Victor & Ricardo, 2004).

$$P_A = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3$$

طبق رابطه ۸، مشخص است، میزان توان تولید شده توسط توربین‌های بادی با توان سوم سرعت متناسب است بطوریکه اگر سرعت جریان باد دو برابر شود میزان توان تولیدی توسط توربین‌های بادی ۸ برابر می‌شود. در راستای محاسبه‌ی چگالی هوایی که به توربین بادی برخورد می‌کند از رابطه ۹ استفاده می‌شود. ρ چگالی هوا است که به طور معمول از ۱,۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۱,۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است (Ingole & Rakhonde, 2015). فشار هوا به کیلوپاسکال، R ثابت گازها به مقدار متوسط ۰,۲۸۷ و T دمای هوا به کلین است.

در توربین‌ها یا روتورهای محور عمودی محور دوران عمود بر سطح زمین و دوران تیغه‌ها به موازات سطح زمین است. به همین دلیل سطحی که توسط باد به حرکت در می‌آید پس از نیم دور چرخش مجبور است در جهت عکس جریان باد به حرکت خود ادامه دهد و این موضوع باعث کاهش کارایی توربین‌ها شده است. در نتیجه، طراحی منحنی‌های پره در توربین‌ها یا روتورهای محور عمودی حیاتی است. یکی از مزایای بارز توربین‌های محور عمودی، عدم تأثیر جهت باد و آشفستگی آن بر کارایی آن‌ها است. در توربین‌های بادی با محور افقی، همه اجزا از جمله پره‌ها، شفت، ژنراتور، در بالای برج بلندی قرار داشته و تیغه‌ها به سمت باد طراحی شده‌اند. محور چرخش پره‌ها نسبت به زمین افقی است و باد با برخورد به تیغه‌ها باعث چرخش آن‌ها می‌شود. در انتهای محور، چرخ دنده‌ای وجود دارد که به ژنراتور متصل است و برق تولید شده

(۷)

برای تصحیح رابطه‌ی ۷، باید ضریبی به عنوان ضریب توان که به پارامترهایی از جمله سرعت باد، سرعت زاویه‌ای پره و شعاع پره وابسته بوده، در آن ضرب شود. پارامتر ضریب توان در حالت تئوری دارای حداکثر مقدار ۰,۵۹۳ است اما بطور کاربردی در بازه‌ی ۰,۳۵ و ۰,۴۵ متغیر است. همچنین براساس قانون بتز، حداکثر مقدار توان جذبی به وسیله‌ی توربین مطابق رابطه‌ی ۸ قابل محاسبه است. در این روابط ρ چگالی هوا، A سطح مقطع عبور جریان هوا، V سرعت حرکت هوا است (Ajao, Mahamood, & Iyanda, 2009). همانطور که به وضوح

$$P_{max} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \quad (8)$$

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (9)$$

در رابطه ۱۰، PL میزان توان کاهش یافته و CD ضریب پسا است که به شکل هندسی توربین وابسته است. میزان توان انرژی تولیدی تئوری ناشی از حرکت پره‌ها مطابق رابطه ۱۱، حاصل شده است.

$$P_L = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times C_D \quad (10)$$

$$P_W = P_A - P_L \quad (11)$$

Dhaka به فاصله‌ی ۳۶۸٫۵ کیلومتر انجام شد و یک قطار ۱۵ واگنه مورد استفاده قرار گرفت. پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی نصب شده بر سقف قطار توانستند در مجموع ۳۱۰٫۹۵ کیلووات انرژی تولید کنند (Rahman et al., 2018).

با نصب توربین‌های بادی بر روی قطار میتوان انرژی تولید کرد. در مواردی که توربین‌های بادی بر سقف قطار نصب می‌شود و انرژی الکتریسیته از حرکت قطار به دست می‌آید، مقاومت هوا در جهت مخالف حرکت قطار وجود دارد. لذا اندکی از پتانسیل انرژی قابل تبدیل به الکتریسیته کاسته می‌شود. این مقدار کاهش توان تولید انرژی از لحاظ تئوری در رابطه ۱۰ اشاره شده است.

گاهی برای استفاده حداکثری از پتانسیل‌های بالقوه تأمین انرژی‌های تجدید پذیر از ترکیب دو سیستم توربین‌های بادی و صفحات خورشیدی سوار بر قطار استفاده می‌شود. رحمان و همکاران در سال ۲۰۱۸ از روشی ترکیبی شامل صفحات خورشیدی و توربین‌های بادی جهت تولید انرژی بهره بردند. این تحقیق در یک مسیر بین شهری از Chittagong تا

۴-۴- تولید انرژی تجدیدپذیر به وسیله نور ارتعاشات

۴-۴-۱- تولید انرژی تجدیدپذیر با القای الکترومغناطیس

فارادی مشهور است، تغییر در میدان مغناطیسی اطراف سیم پیچ باعث تولید جریان الکتریسیته می‌شود. رابطه‌ی القای فارادی به منظور محاسبه‌ی ولتاژ تولیدی با روش سیم پیچ و آهنربا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه V ولتاژ خروجی، N تعداد دور سیم پیچ، $\frac{d\phi_B}{dt}$ مشتق شار مغناطیسی نسبت به زمان است. در سال ۲۰۱۴، پورقدرت و همکاران به منظور بهره‌برداری از انرژی ناشی از ارتعاشات حاصل از افت و خیز ریل در اثر عبور قطار، یک سیم پیچ صوتی القایی را شبیه‌سازی کردند. با در نظر گرفتن سرعت و فرکانس مشخص عبور قطار، موفق به تولید به طور میانگین ۰/۱۶ میلی‌وات انرژی الکتریکی شدند (Pourghodrat, Nelson, Hansen, & Kamarajugadda, & Platt, 2014).

این روش بر مبنای استفاده از ابزار الکترومغناطیس است و هدف آن تولید الکتریسیته برای مصارف جزئی مانند سیگنالینگ، ماشین تعویض خطوط، سنسورهای پایش سلامت راه‌آهن و سیستم جمع آوری و پردازش داده‌ها است (Phillips, Nelson, & Fateh, 2011). از خصوصیات این روش، گستره وسیع تولید انرژی الکتریکی از میکرووات تا کیلووات است (Leijon et al., 2006). دستگاه‌هایی که از این روش کار می‌کنند، بر دو مکانیزم حرکتی خطی و دوار، استوار هستند. در ابتدا محققین مکانیزم خطی را به منظور تولید انرژی مورد استفاده قرار دادند. مکانیزم کار دستگاه‌های تولید انرژی خطی به روش الکترومغناطیس، استفاده از سیم پیچ و آهنربا است. عبور قطار و افت و خیز قائم ریل باعث حرکت نسبی آهنربا و سیم پیچ نسبت به هم می‌شود. طبق رابطه ۱۲ که به قانون القای

$$V = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

(۱۲)

۴-۴-۲- تولید انرژی تجدیدپذیر با پیزوالکتریک

پردازنده و با تست‌های آزمایشگاهی در فرکانس‌های مختلف به تولید انرژی پرداختند (Song, Jang, Kim, & Sung, 2013). همچنین سانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به کاربرد پیزو الکتریک‌ها برای تبدیل ارتعاشات قطارهای پر سرعت به الکتریسیته پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود با تغییر جنس و ابعاد هندسی پیزو الکتریک به بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و هندسی پیزو الکتریک مورد استفاده در راستای تولید حداکثر انرژی پرداختند (Song et al., 2012; Song, 2013). موایی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به منظور برداشت انرژی در سیستم‌های ریلی زیرزمینی مانند مترو و تامین برق برای سنسورهای بی‌سیم، یک دستگاه برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک را برای تبدیل ارتعاشات سیستم مترو به الکتریسیته پیشنهاد دادند. در سال ۲۰۲۰، موایی و همکاران برای برداشت انرژی الکتریکی از یک پیزوالکتریک کنسولی نصب شده بر روی لوکوموتیو، استفاده کردند. فرکانس طبیعی پیزوالکتریک کنسولی به گونه‌ای تنظیم شده بود که با بیشترین فرکانس ممکن در لوکوموتیو هماهنگ شود. (Mouapi, Hakem, & Kandil, 2019). اخیراً تحقیقات زیادی در رابطه با استفاده از نانوژنراتورها برای تولید انرژی انجام شده است. ارتعاشات می‌تواند منبعی برای تولید نانو ژنراتورها باشد. انرژی تولید شده به این روش می‌تواند برای اموری مانند ارتباطات، سیستم ایمنی و کنترل، سنسورهای رطوبت و دما استفاده شود (Cui et al., 2015; Zhao et al., 2017). پیزوالکتریک نانوژنراتور در راستای تولید انرژی استفاده می‌شود. هو و همکاران در سال ۲۰۱۹، در راستای افزایش میزان انرژی تولیدی توسط پیزوالکتریک نانوژنراتور از طراحی‌های مختلف مصالح گوناگون استفاده کردند (Hu et al., 2019). خلاصه نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه کسب انرژی توسط پیزوالکتریک در جدول ۴ بیان شده است.

پیزوالکتریک از یک جرم عایق و تعدادی اجزای مواد تشکیل دهنده پیزو الکتریک ساخته شده است و می‌تواند تنش‌ها یا کرنش‌های وارد شده (بر اساس نوع پیزوالکتریک) را به الکتریسیته تبدیل نماید. کریستال‌های پیزوالکتریک بین دو صفحه فلزی قرار می‌گیرد. در ابتدا کریستال‌ها از لحاظ قطبیت بار الکتریکی در تعادل کامل بوده و جریان الکتریکی را هدایت نمی‌کنند اما پس از اعمال فشار مکانیکی توسط صفحات فلزی به مواد، بارهای الکتریکی درون کریستال از تعادل خارج شده و بارهای منفی و مثبت اضافی در دو طرف مقابل کریستال ظاهر می‌شوند. صفحه فلزی بارها را جمع‌آوری و اختلاف پتانسیل و در نتیجه جریان الکتریکی تولید می‌شود. به هر میزان تنش‌ها و کرنش‌های اعمالی افزایش یابد، میزان انرژی تولید شده نیز افزایش می‌یابد. پیزوالکتریک دارای ویژگی‌های منحصر به فردی از نظر مواد تشکیل دهنده است، بنابراین به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Renaud et al., 2008). عناصر اصلی تشکیل دهنده پیزوالکتریک‌ها سرب بوده و کاربرد این عنصر برای سلامتی مضر است (Hu et al., 2019). معمولاً برای تولید جریان مستقیم از پیزوالکتریک‌ها از دیود و خازن تخت استفاده می‌شود. هنر طراحان آنست که انرژی تلف شده را به حداقل برسانند (Ottman, Hofmann, Bhatt, & Lesieutre, 2002). طراحی پیزو الکتریک‌ها به دو صورت انجام می‌پذیرد. در روش اول، پیزو الکتریک به جسم ارتعاش‌کننده متصل می‌شود. در روش دیگر پیزو الکتریک همانند تیر یک سر گیردار نصب شده و با ارتعاش، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. پورقدرت ونلسون در سال ۲۰۱۲ و پورقدرت و همکاران در سال ۲۰۱۴ نصب پیزوالکتریک در زیر ریل را شبیه‌سازی کردند و موفق شدند ۱٫۱ میلی وات انرژی تولید کنند (Pourghodrat & Nelson, 2012; Pourghodrat et al., 2014). تیانچین و همکاران در سال ۲۰۱۴ از پیزوالکتریک جدیدی که بین بالاست و تراورس نصب می‌شد برای تولید انرژی استفاده کردند و با مدلسازی و کاربرد می‌دانی توانستند از این روش ۱۰۰ میلی وات انرژی تولید کنند (Tianchen et al., 2014). علاوه بر نصب پیزو الکتریک‌ها بر خط ریلی، تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از این ابزار روی وسایل نقلیه ریلی انجام شده است. سانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به تحقیقات در رابطه با نصب پیزو الکتریک بر روی بوژی

جدول ۴. خروجی تحقیقات انجام شده برای تولید انرژی با استفاده از پیزوالکتریک

| محل تولید انرژی | ابعاد (میلیمتر) | مقدار توان تولیدی هر جزء (میلی وات) | اختلاف پتانسیل تولیدی (ولت) | مرجع |
|------------------|-----------------|--|--------------------------------|---|
| خط ریلی | ۲۰ × ۸۰ × ۴۰ | ۰,۳۸ | ۲,۵۵ | (Wischke, Masur, Kröner, & Woias, 2011) |
| وسیله نقلیه ریلی | ۵۳ × ۳۵ × ۵۵ | ۰,۱ | - | (De Pasquale et al., 2012) |
| خط ریلی | - | ۱۱۸۰۰ | - | (Pourghodrat & Nelson, 2012) |
| خط ریلی | ۲۵۰ × ۲۵۰ | ۰,۰۸۱ | - | (Tianchen et al., 2014) |
| وسیله نقلیه ریلی | - | ۲۶,۶ | - | (Amoroso, Pecora, & Ciminello, 2015) |
| خط ریلی | ۸۰ × ۱۷۰ × ۲۰۰ | ۴,۹ | - | (MY Gao, Wang, Cao, Chen, & Liu, 2016) |
| خط ریلی | - | ۰,۰۰۰۲۸۲ | - | (Hamani, Tikani, Assadi, & Ziaei-Rad, 2020) |
| وسیله نقلیه ریلی | - | ۲۰,۹۳ | - | (Lopes, Eckert, Martins, & Santos Jr, 2020) |

۴-۴-۳- تولید انرژی تجدیدپذیر با روش تریبولکتریک

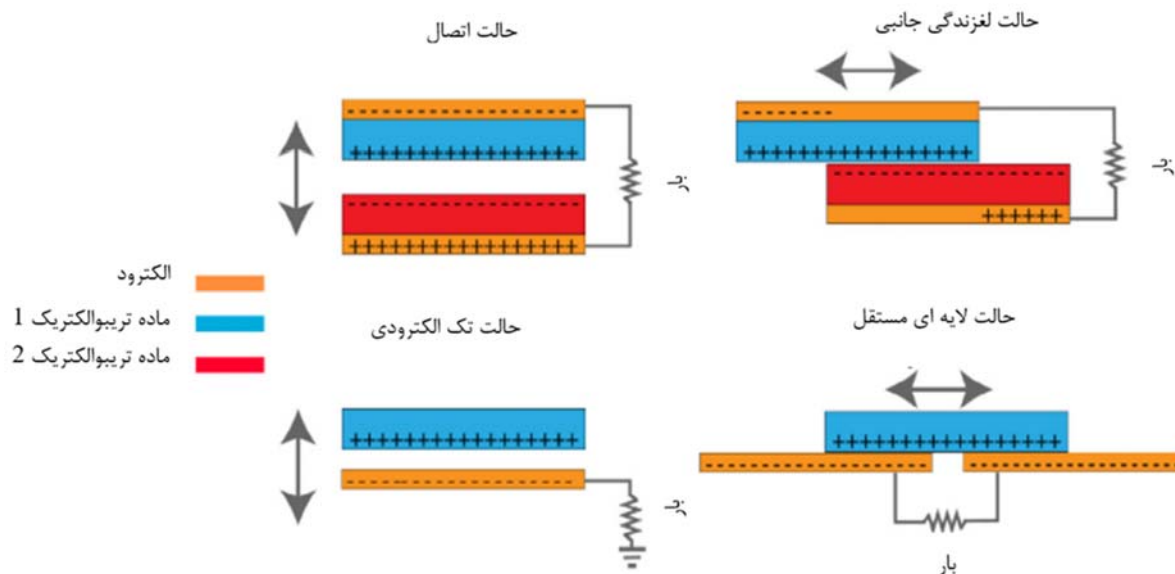
کاربرد این روش برای تولید انرژی در فرکانس‌های پایین، راندمان بالاتری داشته، در راستای تولید انرژی در راه‌آهن توصیه می‌شود. جین و همکاران در سال ۲۰۱۷ روشی را مبتنی بر تامین انرژی سیستم‌های پایش قطارهای سریع السیر توسعه دادند. آن‌ها با ترکیب سیستم‌های نانوژنراتور تریبولکتریک و مولد الکترومغناطیس انرژی قابل توجهی برداشت کردند. بخش نانوژنراتور تریبولکتریک پتانسیل تولید توان انرژی ۰,۳۴ میلی وات بر گرم در مقاومت ۵۰ مگا اهم را داشته است. همچنین مولد الکترومغناطیس، پتانسیل تولید حداکثر توان ۰,۱۲ میلی وات برگرم را در مقاومت ۷۰۰ اهم داشته است (Jin et al., 2017).

اساس این روش بر مبنای پدیده الکترو استاتیک است. اگر دو جسم با یکدیگر تماس و مالش داشته باشند دارای بارهای الکتریکی می‌شوند. توانایی اجسام برای باردار شدن هنگام تماس مالشی، متفاوت است. این ویژگی به قطبیت نسبی مواد مورد استفاده برای ساخت این تجهیزات وابسته است. شکل ۳، نحوه ایجاد اختلاف پتانسیل با مکانیزم مالشی را نشان می‌دهد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ اولین نانو ژنراتور تریبولکتریک را طراحی کردند (J. J. Wang, Penamalli, & Zuo, 2012). راندمان تولید انرژی با استفاده از تریبولکتریک می‌تواند تا ۷۰ درصد باشد. فرکانس عبور بار از خط ریلی غالباً کمتر از ۱۰ هرتز است (G. Zhu et al., 2012) و از آن جایی که

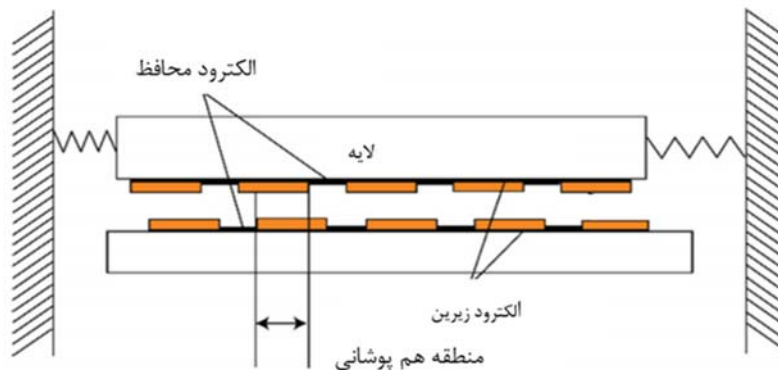
۴-۴-۴- تولید انرژی تجدیدپذیر با خازن

طراحی جدید مطابق شکل ۴ استفاده کردند. در طراحی این خازن صفحه زیرین ثابت شده است و صفحه بالای آن می‌تواند ارتعاش کند. این حرکت نسبی می‌تواند منجر به تولید الکتریسیته گردد. آن‌ها از این روش، یک میکرو وات انرژی تولید نمودند (Suzuki, Miki, Edamoto, & Honzumi, 2010). لالارت و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک سیستم الکترواستاتیکی دو لایه را طراحی کردند. یک لایه قابلیت گذردهی بالا و یک لایه قابلیت گذردهی پایین دارد. در این روش با اعمال فرکانس ۱۰۰ هرتز توانستند ۱,۱ میلی وات انرژی تولید نمایند (Lallart, Pruvost, & Guyomar, 2011).

در این روش بر اساس حرکت نسبی قطب‌های خازن می‌توان اختلاف پتانسیل تولید کرد و از این طریق، جریان الکتریسیته تولید می‌شود. این روش نیازمند شارژ شدن خازن‌ها و اختلاف پتانسیل اولیه بین دو قسمت یک خازن است (Roundy, Wright, & Pister, 2002). کاربرد خازن‌ها در راستای تولید انرژی در فرکانس‌های بارگذاری پایین و استفاده از انرژی تولید شده در سنسورها توصیه می‌شود (Ghavami, Azizi, & Ghazavi, 2018). از جمله مزیت کاربرد این روش، کم هزینه بودن آن است (Spies, Pollak, & Mateu, 2015). سوزوکی و همکاران در سال ۲۰۱۰ از یک خازن با



شکل ۳. انواع روش‌های ایجاد اختلاف پتانسیل و تولید انرژی با روش تریپوالکتریک (Hosseinkhani, Younesian, Eghbali, Moayedizadeh, & Fassih, 2021)



شکل ۴. دستگاه طراحی شده توسط سوزوکی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به منظور کسب الکتریسیته (Suzuki et al., 2010)

۴-۵- تولید انرژی تجدیدپذیر به وسیله صدا

تجدیدپذیر باشد (Grubesa & Suhanek, 2020). در این تحقیق ابتدا میزان صدا و صدا منتشر شده از راه‌آهن بررسی شد و سپس تحقیقات انجام شده در راستای تولید انرژی تجدیدپذیر از صدای راه‌آهن بیان شده است. نوح و همکاران در سال ۲۰۱۸ تحقیقاتی را در زمینه تولید انرژی تجدیدپذیر از صدا راه‌آهن انجام دادند و موفق به طراحی سیستمی در راستای مهار صدا قطارهای سریع السیر شدند. در این تحقیق، صدا قطارهای سریع السیر، فرکانس ۵۰ تا ۲۰۰ هرتز را دربرگرفته است. دستگاه تشدید در مدل تئوری برای فرکانس ۱۷۴ مدلسازی شده است. آنها برای آزمایش سیستم پیشنهادی از برداشت کننده‌های پیزو

آلودگی صوتی از جمله مشکلات اصلی در مناطق صنعتی و پرجمعیت شهرها می‌باشد (Zannin, Engel, Fiedler, & Bunn, 2013). صدای راه‌آهن از جمله منابع آلوده کننده محیط است (Fernandez, Diez, Eguiguren, & Aspuru, 2013). در شکل ۵، منابع تولید کننده آلاینده صوتی توسط راه‌آهن نشان شده است. مهار سروصدای راه‌آهن از جمله در مناطق شهری و مدیریت آن از جمله اقداماتی است که باید توسط برنامه ریزان برای ارتقاء کیفیت زندگی انجام شود (Popović, Lazarević, Brajović, & Vilotijević, 2015). هم چنین این انرژی مهار شده می‌تواند منبع انرژی

تولید شده در ابرخازن‌ها برای استفاده وسایل الکترونیکی کوچک ذخیره شد. این دستگاه شامل چهار بخش ورودی و جمع آوری کننده صدا، تقویت صدا یا ایجاد تشدید، مولد الکتروسیته و ذخیره انرژی است. هر واحد از این دستگاه قادر است که حداکثر ۷۴٫۶ میلی ولت اختلاف پتانسیل را در ۱۱۰ دسی بل تولید نماید (Y. Wang et al., 2018).

الکترونیک با شکل‌های هندسی دایره‌ای و مستطیلی شکل استفاده کردند و موفق به تولید ۰٫۷ ولت اختلاف پتانسیل در فشار ۱۰۰ دسی بل شدند (Noh, 2018). وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، ساختاری شبیه لانه زنبور را طراحی و اجرا کردند. این دستگاه علاوه بر مهار سر و صدای ناشی از قطارهای سریع السیر، با تقویت فشار صدای منتشر شده، انرژی تولید می‌کند. این انرژی



شکل ۵. منابع انتشار صوت در سیستم حمل و نقل ریلی

هوشمندسازی راه‌آهن

در سال‌های اخیر، کاربرد هوش مصنوعی در هوشمندسازی زندگی انسان گسترش یافته است. هوش مصنوعی به سامانه‌هایی اطلاق می‌شود که می‌توانند رفتارها و واکنش‌های هوشمندانه انسانی از جمله درک شرایط پیچیده، شبیه‌سازی فرایندهای تفکری و استدلال، و پاسخ موفق به آن‌ها، همچنین توانایی یادگیری و کسب دانش برای حل مسائل را شبیه‌سازی نمایند. استفاده از هوش مصنوعی در حوزه حمل و نقل ریلی، به ویژه در سیستم‌های ریلی سریع السیر، نقش اساسی در بهبود ایمنی و کارایی انرژی این سیستم‌ها دارد. تکنیک‌های اساسی هوش مصنوعی مورد بحث در سیستم حمل و نقل ریلی شامل بکارگیری منطق فازی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های ژنتیک بوده که برای برنامه ریزی، کنترل و تعمیر و نگهداری هوشمند به ویژه برای خطوط ریلی پر سرعت استفاده شده است. سیستم هوش مصنوعی مانند سایر سیستم‌ها شامل اطلاعات ورودی، پردازش سیستمی و اطلاعات خروجی می‌باشد که تفاوت اصلی آن با سایر سیستم‌ها در شیوهی پردازش داده‌ها است. داده‌های ورودی به این سیستم می‌تواند داده‌های بزرگ باشد. با فناوری‌های ارتباطی در حال توسعه، رفتار یک سیستم پیچیده

را می‌توان با استفاده از حسگرهای تکامل یافته، گردآوری داده‌ها، ذخیره‌سازی داده‌ها، انتقال داده و ابزارهای تحلیل داده که برای یک هدف ویژه تکامل یافته است، تجزیه و تحلیل کرد. اطلاعات و داده‌های مربوط به شرایط زمانی آینده به وسیلهی پیش بینی هوشمند استخراج می‌شود تا به طور مداوم شرایط سلامتی را ردیابی و خطرات احتمالی را هشدار دهد. یک سیستم تعمیر و نگهداری بر مبنای منطق فیزیکی-سایبری، کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی را برای مدیریت پیش بینی هوشمند ممکن می‌سازد. با پردازش هوشمند اطلاعات ارسالی از حسگرها توسط هوش مصنوعی می‌توان علت بروز انواع و دلیل خرابی‌ها را در طول دوره طرح پیش بینی کرد. کاربرد هوش مصنوعی شامل پیش‌بینی خطا، بررسی ریسک، بررسی سلامت و تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان است (Hadj-Mabrouk, 2019). بخش‌های مختلف راه‌آهن نیز از کاربرد هوش مصنوعی بی‌بهره نیست. اگرچه کاربرد هوش مصنوعی در راه‌آهن، هنوز در مراحل اولیهی خود قرار دارد، شواهد نشان دهنده آنست که این پتانسیل نباید دست کم گرفته شود. توریسیو و همکاران در سال ۲۰۰۲، نقش هوش مصنوعی در ارتقاء بخش‌های مختلف راه‌آهن از جمله

سیستم تعلیق بین محور چرخ و بوژی و سیستم تعلیق بین بوژی و بدنه‌ی واگن است. یکی از روش‌های مهم برای پایش وضعیت حرکت قطارها، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی با نصب ارتعاش سنج‌ها و حسگرها بر روی بوژی‌های قطار است. تجزیه و تحلیل ارتعاشات مکانیکی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از بوژی‌ها به یک موضوع تحقیقاتی مهم تبدیل شده است. پایش وضعیت ارتعاشی واگن‌ها به انرژی نیاز داشته و انرژی تولید شده از ارتعاشات واگن‌ها می‌تواند انرژی مورد نیاز برای پایش آنها را تامین کند. در حال حاضر با توجه به گسترش خطوط ریلی و افزایش وسایل نقلیه ریلی، تحلیل تجربی سیگنال‌های ارسالی از واگن‌ها نمی‌تواند الزامات داده‌های بزرگ را برآورده سازد. تولید انرژی تجدیدپذیر و مصرف آن در راستای دریافت، ارسال و تحلیل سیگنال‌ها می‌تواند گزینه‌ای مناسب جهت توسعه سیستم‌های پایش قطارها باشد.

سرویس دهی به مسافران و ایمنی را مورد بررسی قرار دادند (Asber, 2020). گیرت و همکاران در سال ۲۰۱۷، بر نقش هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف راه‌آهن تأکید داشتند. آنها باور داشتند که در آینده‌ای نزدیک، هوش مصنوعی نقش مهمی در همه‌ی بخش‌های راه‌آهن خواهد داشت (Gibert, Patel, & Chellappa, 2016). تعدادی از کاربردهای مهم هوش مصنوعی در راه‌آهن عبارت است از تعمیر و نگهداری، ایمنی، رانندگی، کنترل اتوماتیک، مدیریت، برنامه ریزی ترافیکی، بهینه سازی عبور و مرور مسافری و پیش بینی خرابی‌های احتمالی در خط و وسیله نقلیه ریلی. ناوگان ریلی به طور مداوم به پایش نیاز داشته زیرا هرگونه آسیبی به ناوگان ریلی موجب کاهش ایمنی و راحتی سفر و آسیب به زیرساخت‌های ریلی خواهد شد. بررسی وضعیت ناوگان ریلی از طریق نصب حسگرها بر سیستم تعلیق بوژی انجام می‌گیرد. سیستم تعلیق قطارها شامل دو بخش

۵- نتیجه گیری

-نتایج نشان می‌دهد، روش ترکیبی شامل صفحات خورشیدی و توربین‌های بادی نصب شده بر روی سقف قطار، می‌تواند بیشترین انرژی را به طور متوسط در طول یک شبانه روز در میان همه‌ی روش‌ها تولید نماید. در سفر یک روزه قطار مذکور (۱۵ واگن با نصب یک توربین بادی روی هر واگن)، ۳۶ کیلووات ساعت انرژی از توربین‌های بادی و ۲۷۴٫۹۵ کیلووات ساعت انرژی از یک سطح ۳۴ متر مربع از صفحات خورشیدی تولید می‌شود که مقدار قابل توجهی است و می‌تواند جهت مصرف قطار مورد استفاده قرار گیرد.

-با توجه به تحقیقات انجام شده، تولید انرژی از طریق ارتعاشات با استفاده از پاسخ دینامیکی پل‌های صلب راه‌آهن، نسبت به روش‌های دیگر برای تولید انرژی، عملکرد بهتری دارد. اگر ابزار برداشت کننده‌ای وجود داشته باشد که فرکانس وسیعی از ارتعاشات را پوشانند، می‌توان انرژی بیشتری را برداشت کرد. به عنوان مثال، برای افزایش توان تولیدی، استفاده از یک سیستم تولید انرژی چهار جزئی شامل فنر، بلوک سربی، سیم پیچ و آهنربای دائمی پیشنهاد می‌شود. مقادیر جرم اجزا، سختی فنر و فرکانس طبیعی هر جزء باید بر اساس فرکانس الگوی خط طراحی شود.

سوخت‌های فسیلی تجدیدپذیر نبوده و نمی‌توانند به طور دائمی به عنوان سوخت مورد نیاز صنایع و فعالیت‌های بشر مورد استفاده قرار بگیرند. دستیابی به منابع پایدار انرژی اجتناب‌ناپذیر است و به همین دلیل، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در بسیاری از کشورهای جهان در حال انجام است. حمل و نقل، به ویژه بخش حمل و نقل ریلی، دارای پتانسیل بالایی در تولید انرژی است و امروزه با پیشرفت فناوری‌های نوین و ابداع روش‌های مختلف در زمینه تولید انرژی، اقدامات مهمی در راستای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت راه‌آهن انجام شده است. چهار منبع اصلی برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت راه‌آهن عبارتند از ترموالکتریک، نور خورشید، باد و صدا / ارتعاشات راه‌آهن. پتانسیل‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در زیرساخت‌های خطوط ریلی و همچنین در وسایل نقلیه محرک در خطوط راه‌آهن عبارتند از:

-استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک برای تولید انرژی از آنتالپی گاز خروجی از آگروز دیزل الکتریک برای کسب انرژی حداکثر از روش ترموالکتریک توصیه می‌شود. از طرف دیگر، باید به این نکته توجه شود که هر چقدر گرادیان حرارتی بالاتر باشد، توان انرژی تولیدی نیز بالاتر خواهد بود.

- management approach in electronic applications. *J. Teknologi*, 73.
- Ciccarelli, F., Di Noia, L. P., & Rizzo, R. (2018). Integration of photovoltaic plants and supercapacitors in tramway power systems. *Energies*, 11(2), 410.
- Cooke, L. (2017). <https://inhabitat.com/the-worlds-first-100-solar-powered-train-launches-in-australia/>.
- Cozzi, L., Gould, T., Bouckart, S., Crow, D., Kim, T.-Y., McGlade, C., et al. (2020). World energy outlook 2020. *International Energy Agency: Paris, France*, 1-461.
- Cui, N., Gu, L., Liu, J., Bai, S., Qiu, J., Fu, J., et al. (2015). High performance sound driven triboelectric nanogenerator for harvesting noise energy. *Nano Energy*, 15, 321-328.
- Darshana, M. K., Karnataki, K., Shankar, G., & Sheela, K. (2015). A practical implementation of energy harvesting, monitoring and analysis system for solar photo voltaic terrestrial vehicles in Indian scenarios: A case of pilot implementation in the Indian Railways. *Paper presented at the 2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*.
- de Fer, U. I. d. C. (2010). Necessities for future high-speed rolling stock, UIC High-Speed.
- De Pasquale, G., Somà, A., & Fraccarollo, F. (2012). Piezoelectric energy harvesting for autonomous sensors network on safety-improved railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(4), 1107-1117.
- Ebrahimi, A., Tinjum, J. M., & Edil, T. B. (2014). Maintenance model for railway substructure. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 45(1), 48-55.
- Falamarzi, A., Moridpour, S., Nazem, M., & Hesami, R. (2018). Rail degradation prediction models for tram system: Melbourne case study. *Journal of Advanced Transportation*.
- Fathali, M., Chalabii, J., Astaraki, F., & Esmaeili, M. (2021). A new degradation model for life cycle assessment of railway ballast materials. *Construction and Building Materials*, 270, 121437.
- Ferestade, I., Tehrani, P. H., & Heidary, R. (2017). Fracture toughness estimation of ballast stone used in Iranian railway. *Journal of Rock*
- Ajao, K., Mahamood, M., & Iyanda, M. (2009). Interface for modeling the power output of a small wind turbine. *Indian Journal of Science and Technology*, 2(5), 13-17.
- Alabbasi, Y., & Hussein, M. (2021). Geomechanical modelling of railroad ballast: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 815-839.
- Amoroso, F., Pecora, R., & Ciminello, M. (2015). An original device for train bogie energy harvesting: a real application scenario. *Smart Structures and Systems*, 16(3), 383-399.
- Asber, J. (2020). A Machine Learning-Based Approach for Fault Detection of Railway Track and its Components.
- Asensio, J. (2000). The success story of Spanish suburban railways: determinants of demand and policy implications. *Transport Policy*, 7(4), 295-302.
- Berti, A. (2019). <https://www.railway-technology.com/features/solar-powered-trains/>.
- Bischoff, R., Meyer, J., Enochsson, O., Feltrin, G., & Elfgren, L. (2009). Event-based strain monitoring on a railway bridge with a wireless sensor network. *Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Zurich, Switzerland.
- Bosso, N., Magelli, M., & Zampieri, N. (2021). Application of low-power energy harvesting solutions in the railway field: a review. *Vehicle System Dynamics*, 59(6), 841-871.
- Bulbul, M. A. K., Laskar, M. A. R., Chy, M. W. T. S., & Sahariat, M. (2017). Energy harvesting for electric train: application of multi-renewable energy sources with sophisticated technology. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 4(11), 858-865.
- Chen, C., & Jiang, W. L. (2014). Sharing Chinese Infrastructure Experience: Selected Best Practices in High-Speed Railway Projects. *Applied Mechanics and Materials*, 584, 2326-2332.
- Chen, J., Yao, X., & Li, S. (2013). Study on the influence of ventilation condition on the heat release rate of the CRH passenger rail car. *Procedia Engineering*, 62, 1050-1056.
- Chuan, L. C., Wahid, H., Rahim, H. A., & Rahim, R. A. (2015). A review of thermoelectric energy harvester and its power

- (2012). Potentials, peculiarities and prospects of solar power generation on the railway premises. *Paper presented at the 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*.
- He, K., Gao, G.-j., Wang, J.-b., Fu, M., Miao, X.-j., & Zhang, J. (2018). Performance of a turbine driven by train-induced wind in a tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82, 416-427.
- Hosseinkhani, A., Younesian, D., Eghbali, P., Moayedizadeh, A., & Fassih, A. (2021). Sound and vibration energy harvesting for railway applications: A review on linear and nonlinear techniques. *Energy Reports*, 7, 852-874.
- Hou, W., Li, Y., Guo, W., Li, J., Chen, Y., & Duan, X. (2018). Railway vehicle induced vibration energy harvesting and saving of rail transit segmental prefabricated and assembling bridges. *Journal of Cleaner Production*, 182, 946-959.
- Hu, D., Yao, M., Fan, Y., Ma, C., Fan, M., & Liu, M. (2019). Strategies to achieve high performance piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 55, 288-304.
- Ingole, A. S., & Rakhonde, B. S. (2015). Hybrid power generation system using wind energy and solar energy. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(3), 1-4.
- Ižvolt, L., Ižvoltová, J., & Šestáková, J. (2014). Influence of construction of railway superstructure on railway quality. *Applied Mechanics and Materials*, 617, 54-59.
- Ižvolt, L., & Šmalo, M. (2014). Historical development and applications of unconventional structure of railway superstructure of the railway infrastructure of the Slovak Republic. *Civil and Environmental Engineering*, 10(1), 79-94.
- Jaffery, S. H. I., Khan, M., Ali, L., Khan, H. A., Mufti, R. A., Khan, A., et al. (2014). The potential of solar powered transportation and the case for solar powered railway in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 270-276.
- Jiang, W., Yuan, D., Xu, S., Hu, H., Xiao, J., Sha, A., et al. (2017). Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, 205, 941-950.
- Jiang, Y., Qahouq, J. A. A., & Batarseh, I. (2010). Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison. *Paper presented at the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*.
- Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(5), 892-899.
- Fernandez, P., Diez, I., Eguiguren, J. L., & Aspuru, I. (2013). Noise barriers customized to abate non conventional noise sources. *Paper presented at the INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*.
- Freer, R., & Powell, A. V. (2020). Realising the potential of thermoelectric technology: A Roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(2), 441-463.
- Gao, M., Su, C., Cong, J., Yang, F., Wang, Y., & Wang, P. (2019). Harvesting thermoelectric energy from railway track. *Energy*, 180, 315-329.
- Gao, M., Wang, P., Cao, Y., Chen, R., & Liu, C. (2016). A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration. *Journal of vibroengineering*, 18(7), 4647-4663.
- Gatti, G., Brennan, M., Tehrani, M., & Thompson, D. (2016). Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66, 785-792.
- Ghavami, M., Azizi, S., & Ghazavi, M. R. (2018). On the dynamics of a capacitive electret-based micro-cantilever for energy harvesting. *Energy*, 153, 967-976.
- Gibert, X., Patel, V. M., & Chellappa, R. (2016). Deep multitask learning for railway track inspection. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 18(1), 153-164.
- GirishK.G. Solartrain PoweronWheels.
- Grubesa, S., & Suhanek, M. (2020). Traffic noise *Noise and Environment*: IntechOpen.
- Gupta, G., Kaushik, D., Mathur, K., Pal, R., & Bhatnagar, P. (2016). Power Generation through Wind Turbine in Locomotives & validation of performance parameters for a Bi-Directional Wind Turbine: Wells Turbine. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 4, 366.
- Hadj-Mabrouk, H. (2019). Contribution of artificial intelligence to risk assessment of railway accidents. *Urban Rail Transit*, 5(2), 104-122.
- Hamani, I. D., Tikani, R., Assadi, H., & Ziaei-Rad, S. (2020). Energy harvesting from moving harmonic and moving continuous mass traversing on a simply supported beam. *Measurement*, 150, 107080.
- Hayashiya, H., Itagaki, H., Morita, Y., Mitoma, Y., Furukawa, T., Kuraoka, T., et al.

- enhancement using variable equivalent permittivity. *Physics Letters A*, 375(45), 3921-3924.
- Leijon, M., Danielsson, O., Eriksson, M., Thorburn, K., Bernhoff, H., Isberg, J., et al. (2006). An electrical approach to wave energy conversion. *Renewable Energy*, 31(9), 1309-1319.
- Li, X., Yang, T., & Shi, Q. (2013). Applicative suburban line pattern of urban rail transit in China. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2260-2266.
- Lin, T., Pan, Y., Chen, S., & Zuo, L. (2018). Modeling and field testing of an electromagnetic energy harvester for rail tracks with anchorless mounting. *Applied Energy*, 213, 219-226.
- Lixin, Z., & Fengli, W. (2017). Strategy for China intercity-railway operation management model based on varied investors. *Transportation research procedia*, 25, 3808-3816.
- Long, J., Xia, K., Zhong, H., Lu, H., & Yongga, A. (2021). Study on energy-saving operation of a combined heating system of solar hot water and air source heat pump. *Energy Conversion and Management*, 229, 113624.
- Lopes, M. V., Eckert, J. J., Martins, T. S., & Santos Jr, A. A. (2020). Optimizing strain energy extraction from multi-beam piezoelectric devices for heavy haul freight cars. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1), 59.
- Ma, M. Q., Lei, F. P., Ren, Y. Q., & Mu, B. S. (2015). A simulation research for railroad freight car-to-car end impact based on numerical analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 764, 1020-1025.
- Maxwell, R. R. (1999). Intercity rail fixed-interval, timed-transfer, multihub system: Applicability of the Integraler Taktfahrplan Strategy to North America. *Transportation Research Record*, 1691(1), 1-11.
- Mouapi, A., Hakem, N., & Kandil, N. (2019). Cantilevered piezoelectric micro generator design issues and application to the mining locomotive. *Energies*, 13(1), 63.
- Nelson, C. A., Platt, S. R., Albrecht, D., Kamarajugadda, V., & Fateh, M. (2008). Power harvesting for railroad track health monitoring using piezoelectric and inductive devices. *Paper presented at the Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*.
- Jibhkate, A., Joshi, S., & Nandanwar, Y. (2013). Overview of thermoelectric power generation technologies-various opportunities with solar. *Paper Presented at the National Conference on Advances in Renewable Energy Engineering*.
- Jin, L., Deng, W., Su, Y., Xu, Z., Meng, H., Wang, B., et al. (2017). Self-powered wireless smart sensor based on maglev porous nanogenerator for train monitoring system. *Nano Energy*, 38, 185-192.
- Johansson, T. B., Patwardhan, A. P., Nakićenović, N., & Gomez-Echeverri, L. (2012). Global energy assessment: toward a sustainable future, *Cambridge University Press*.
- Johari, M. K., Jalil, M., & Shariff, M. F. M. (2018). Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.13), 74-80.
- ju Kim, H., young Jeong, J., wook Kim, J., & kyung Oh, J. (2016). A factor analysis of urban railway casualty accidents and establishment of preventive response systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 218, 131-140.
- Jugsujinda, S., Jugsujinda, P., & Seetawan, T. (2012). The Derivation of Efficiency Equation of the Prototype of Pico Wind Turbine Produces the Electricity. *Procedia Engineering*, 32, 994-999.
- Kaewunruen, S., Aikawa, A., & Remennikov, A. M. (2019). The importance of 'dynamics' in the design and performance-based testing criteria for railway track components. *Procedia Structural Integrity*, 21, 83-90.
- Kim, D.-Y., Kim, Y.-H., & Kim, B.-S. (2021). Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear. *Energy*, 214, 119051.
- Köllő, S. A., Puskás, A., & Köllő, G. (2015). Ballasted track versus ballastless track. *Key Engineering Materials*, 660, 219-224.
- Kuik, O., Branger, F., & Quirion, P. (2019). Competitive advantage in the renewable energy industry: Evidence from a gravity model. *Renewable Energy*, 131, 472-481.
- Kumar, A., Karandikar, P., & Chavan, D. S. (2015). Generating and saving energy by installing wind turbines along the railway tracks. *Paper presented at the 2015 International Conference on Energy Systems and Applications*.
- Lallart, M., Pruvost, S., & Guyomar, D. (2011). Electrostatic energy harvesting

- Pourghodrat, A., Nelson, C. A., Hansen, S. E., Kamarajugadda, V., & Platt, S. R. (2014). Power harvesting systems design for railroad safety. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(5), 504-521.
- Pyrgidis, C. N. (2021). Railway transportation systems: design, construction and operation. *CRC Press*.
- Rahman, M. A., Ullah, M. W., Foisal, M. M. A., Hannan, M. S., Al Azha, A., & Mohim, M. S. (2018). A Proposed Combined Renewable Energy System for Train. *Paper presented at the 2nd European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM European Conference Paris, France, July, 26-27)*.
- Renaud, M., Karakaya, K., Sterken, T., Fiorini, P., Van Hoof, C., & Puers, R. (2008). Fabrication, modelling and characterization of MEMS piezoelectric vibration harvesters. *Sensors and Actuators A: Physical*, 145, 380-386.
- Roundy, S., Wright, P. K., & Pister, K. S. (2002). Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. *Paper Presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Roy, J. S., Morency, S., Dugas, G., & Messaddeq, Y. (2021). Development of an extremely concentrated solar energy delivery system using silica optical fiber bundle for deployment of solar energy: Daylighting to photocatalytic wastewater treatment. *Solar Energy*, 214, 93-100.
- Ruscelli, A. L., Cecchetti, G., & Castoldi, P. (2017). Energy harvesting for on-board railway systems. *Paper presented at the 2017 5th IEEE international conference on models and technologies for intelligent transportation systems (MT-ITS)*.
- Sadeghi, J., Hasheminezhad, A., & Essmayil Kaboli, M. (2015). Investigation of the influences of track superstructure parameters on ballasted railway track design. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 48(1), 157-174.
- Sadeghi, J., Najar, M. M., Zakeri, J., & Kuttelwascher, C. (2019). Development of railway ballast geometry index using automated measurement system. *Measurement*, 138, 132-142.
- Sadeghi, J., Zakeri, J. A., & Najar, M. (2016). Developing track ballast characteristic
- Nerişanu, R., & Drăgan, D. (2017). Study of the Negative Effects of Railway Transport Systems upon Constructions. *Paper presented at the Advanced Engineering Forum*.
- NEWS, G. T. (2019). <https://www.iamrenew.com/green-transportation/indian-railways-danapur-division-to-go-green-with-solar/>.
- Noh, H.-M. (2018). Acoustic energy harvesting using piezoelectric generator for railway environmental noise. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(7), 1687814018785058.
- Ortiz, J., Monje, P. M., Zabala, N., Arsuaga, M., Etxaniz, J., & Aranguren, G. (2014). New proposal for bogie-mounted sensors using energy harvesting and wireless communications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(7), 807-820.
- Ottman, G. K., Hofmann, H. F., Bhatt, A. C., & Lesieutre, G. A. (2002). Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5), 669-676.
- Panahi, E., & Younesian, D. (2020). Acoustic performance enhancement in a railway passenger carriage using hybrid ray-tracing and image-source method. *Applied Acoustics*, 170, 107527.
- Park, H., & Kim, J. (2016). Electromagnetic induction energy harvester for high-speed railroad applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3, 41-48.
- Phillips, K. J., Nelson, C. A., & Fateh, M. (2011). Simulation and control system of a power harvesting device for railroad track health monitoring. *Paper presented at the Health Monitoring of Structural and Biological Systems*.
- Popović, Z., Lazarević, L., Brajović, L., & Vilotjević, M. (2015). The importance of rail inspections in the urban area-aspect of head checking rail defects. *Procedia Engineering*, 117, 596-608.
- Pourghodrat, A., & Nelson, C. A. (2012). A system for generating electricity using the passage of train wheels for improving railroad track safety. *Paper presented at the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.

- analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges. *Developments in the Built Environment*, 4, 100033.
- Tianchen, Y., Jian, Y., Ruigang, S., & Xiaowei, L. (2014). Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles. *Smart materials and structures*, 23(12), 125046.
- Ulianov, C., Hadaš, Z., Hyde, P., & Smilek, J. (2020). Novel energy harvesting solutions for powering trackside electronic equipment. *Sustainable Rail Transport*, 229-255.
- Vasisht, M. S., Vashista, G., Srinivasan, J., & Ramasesha, S. K. (2017). Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study. *Energy*, 118, 684-691.
- Victor, L., & Ricardo, A. (2004). Interfas TIMEO-ANSYS, for the modeling one and modal analysis of an airfoil of turbine of wind IV. *Paper presented at the Conferencia de Diseño e Ingeniería por Computadora, San Miguel de Allende*.
- Walker, G. (2001). Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, 21(1), 49-55.
- Wang, J. J., Penamalli, G., & Zuo, L. (2012). Electromagnetic energy harvesting from train induced railway track vibrations. *Paper presented at the Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*.
- Wang, Y., Zhu, X., Zhang, T., Bano, S., Pan, H., Qi, L., et al. (2018). A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film. *Applied Energy*, 230, 52-61.
- Wischke, M., Masur, M., Kröner, M., & Woias, P. (2011). Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes. *Smart Materials and Structures*, 20(8), 085014.
- Wright, A. K., & Wood, D. (2004). The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(14-15), 1265-1279.
- Wu, M., Huang, H., Huang, B., Tang, C., & Cheng, C. (2009). Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting. *Renewable Energy*, 34(8), 1934-1938.
- guideline in order to evaluate its performance. *International Journal of Railway*, 9(2), 27-35.
- Sathish, T., Subramanian, D. B., Muthukumar, K., & Karthick, S. (2020). Design and simulation of wind turbine on rail coach for power generation. *Materials Today. Proceedings*, 33, 2535-2539.
- Seidenglanz, D., Chvátal, F., & Nedvedová, K. (2014). Comparison of urban and suburban rail transport in Germany and in the Czech Republic. *Review of Economic Perspectives*, 14(2), 165.
- Senda, K., & Makino, Y. (1996). Application of Solar Cell Integrated Roofing Material at Railway Stations. *Fuji Electric Review*, 49(2).
- Sindhuja, B. (2014). A proposal for implementation of wind energy harvesting system in trains. *Paper presented at the Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*.
- Song, D., Jang, H., Kim, S. B., & Sung, T. H. (2013). Piezoelectric energy harvesting system for the vertical vibration of superconducting Maglev train. *Journal of Electroceramics*, 31, 35-41.
- Song, D., Yang, C. H., Hong, S. K., Kim, S. B., Woo, M. S., & Sung, T. H. (2012). Feasibility study on application of piezoelectricity to convert vibrations of Korea Train eXpress. *Paper presented at the Proceedings of ISAF-ECAPD-PFM*.
- Song, D., Yang, C. H., Hong, S. K., Kim, S. B., Woo, M. S., & Sung, T. H. (2013). Study on application of piezoelectricity to Korea Train eXpress (KTX). *Ferroelectrics*, 449(1), 11-23.
- Spies, P., Pollak, M., & Mateu, L. (2015). *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*, CRC Press.
- Suzuki, Y., Miki, D., Edamoto, M., & Honzumi, M. (2010). A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(10), 104002.
- Swanson, J. D., & Thornes, C. (2010). Light-rail transit systems. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 5(2), 22-27.
- Tang, S., Hong, H., Jin, H., & Xuan, Y. (2019). A cascading solar hybrid system for co-producing electricity and solar syngas with nanofluid spectrum selector. *Applied Energy*, 248, 231-240.
- Tasneem, Z., Al Noman, A., Das, S. K., Saha, D. K., Islam, M. R., Ali, M. F., et al. (2020). An

- Zhao, X., Wei, G., Li, X., Qin, Y., Xu, D., Tang, W., et al. (2017). Self-powered triboelectric nano vibration accelerometer based wireless sensor system for railway state health monitoring. *Nano Energy*, 34, 549-555.
- Zheng, H., & Cao, X. (2021). Impact of high-speed railway construction on spatial relationships in the Guanzhong Plain urban agglomeration. *Regional Sustainability*, 2(1), 47-59.
- Zhou, F., Song, X., Xu, R., & Ji, C. (2020). Optimization of urban rail transit connection scheme for evacuating large volumes of arriving railway passengers. *IEEE Access*, 8, 68772-68786.
- Zhou, W., Tian, J., Deng, L., & Qin, J. (2015). Integrated optimization of service-oriented train plan and schedule on intercity rail network with varying demand. *Discrete Dynamics in Nature and Society*.
- Zhu, G., Pan, C., Guo, W., Chen, C.-Y., Zhou, Y., Yu, R., et al. (2012). Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano Letters*, 12(9), 4960-4965.
- Zhu, L., Xu, Y., & Pan, Y. (2019). Enabled comparative advantage strategy in China's solar PV development. *Energy Policy*, 133, 110880.
- Xu, G., & Sankar, L. N. (2000). Computational study of horizontal axis wind turbines. *J. Sol. Energy Eng.*, 122(1), 35-39.
- Yao, D. M., & Jiang, D. Y. (2014). The research on area classification in intercity rail traffic forecast based on cluster analysis. *Advanced Materials Research*, 945, 3296-3299.
- Yin, C., Ke, Y., Yan, Y., Lu, Y., & Xu, X. (2020). Operation plan of China Railway Express at inland railway container center station. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), 249-262.
- Yu, F., Lin, F., Tang, Y., & Zhong, C. (2019). High speed railway to success? The effects of high speed rail connection on regional economic development in China. *Journal of Regional Science*, 59(4), 723-742.
- Zannin, P. H. T., Engel, M. S., Fiedler, P. E. K., & Bunn, F. (2013). Characterization of environmental noise based on noise measurements, noise mapping and interviews: A case study at a university campus in Brazil. *Cities*, 31, 317-327.
- Zhang, H. P., Zuo, J. Y., Hu, G., Han, F., & Zhao, T. F. (2016). The Simulation of One Metro Wheel Tread Temperature in Cycle Braking Condition. *Paper presented at the 3rd Annual International Conference on Mechanics and Mechanical Engineering (MME 2016)*.

Investigating the Potentials of Rail Transportation Systems in Renewable Energy Production

Mohammad Mohsen Kabiri Nasrabad, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Rashid Tanzadeh, Post Doc., Grad., Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Ferydon Moghaddas Nejad, Professor, Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: rashidanzadeh@aut.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

The railway transportation system can be considered as a source for renewable energy production, whereby the use of thermoelectric generators in locomotive exhausts and rail structures, installation of solar panels and small wind turbines with regular geometric specifications on train roofs or in the vicinity of rail lines, and connection of piezoelectric absorbers of vibration and sound on rail lines and rail vehicles have had a significant impact on the production of renewable energies from railways. The results have shown that the maximum energy output produced by thermoelectric generators is 20 milliwatts per square millimeter. In simultaneous application, solar cells installed with an equivalent area of 34 square meters per wagon on the roof of a 15-wagon train and horizontal-axis wind turbines with an equivalent area of 0.785 square meters per wagon have produced a maximum energy output of 311 kilowatts per wagon, which is nearly 9 times the power output of wind turbines installed on the train roof. According to the results, the simultaneous use of wind turbines and solar cells is preferred in terms of energy production capacity.

Keywords: Renewable Energy, Rail Transport, Electricity Generation, Smartening