



مدل‌سازی و ارزیابی سرعت بحرانی واگن‌های مخزن‌دار در محیط‌های عملیاتی: تأثیر همزمان هندسه مسیر و میزان پرشدن مخزن

شکيب صادقي^۱، مجيد شهروي^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲ دانشیار گروه ماشین ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹

چکیده

حمل مواد خطرناک به واسطه ریسک بالقوه حوادث، همواره به عنوان یک معضل ایمنی در حمل و نقل ریلی حائز اهمیت مطرح شده است. در این تحقیق، مدل‌سازی و ارزیابی جامع سرعت بحرانی واگن‌های مخزن‌دار با در نظر گرفتن اندرکنش دو متغیر اصلی هندسه مسیر (طیفی از شعاع‌های قوس از ۲۵۰ متر به بالا) و درصد پرشدگی مخزن (در سه حالت مختلف) مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی سیستم به روش دینامیک چند جسمی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار UM انجام شده است؛ به علاوه، برای مدل‌سازی دینامیک سیال درون مخزن از مدل پاندول معادل استفاده گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های پارامتریک نشان می‌دهد که سرعت بحرانی واگن روند افزایشی خطی را با افزایش شعاع قوس تجربه می‌کند، در حالی که در مقابل، با افزایش درصد پرشدگی مخزن، رابطه‌ای معکوس و غیرخطی را از خود بروز می‌دهد. تحلیل‌ها حاکی از آن است که تأثیر متقابل این دو عامل بر پایداری واگن قابل ملاحظه است؛ به نحوی که در قوس‌های با شعاع کم، افزایش جرم سیال باعث کاهش محسوس سرعت بحرانی می‌گردد. این پدیده در شعاع‌های بزرگ نیز، با وجود سرعت‌های مجاز بالاتر، پابرجا بوده و مدیریت دقیق را الزامی می‌سازد. یافته‌های این پژوهش، بر ضرورت بازنگری در استانداردهای ایمنی و طراحی پروتکل‌های کنترلی مبتنی بر شرایط لحظه‌ای مسیر و میزان پرشدگی مخزن تأکید دارد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت بحرانی در قوس ۲۵۰ متری و پرشدگی ۹۵٪ برابر ۳۰ متر بر ثانیه است، در حالی که با افزایش شعاع به ۱۰۰۰ متر و کاهش پرشدگی به ۲۰٪، به ۶۲ متر بر ثانیه می‌رسد.

کلمات کلیدی: واگن مخزن‌دار؛ سرعت بحرانی؛ پایداری دینامیکی؛ تلاطم سیال؛ هندسه مسیر؛ شبیه‌سازی.

Modeling and Evaluation of the Critical Speed of Tank Cars in Operational Environments: The Simultaneous Effect of Track Geometry and Tank Filling

Shakib Sadeghi¹, Majid Shahravi^{2,*}

¹ Railway. Eng., IUST., Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Railway. Eng., IUST., Tehran, Iran.

Abstract

The railway transportation of hazardous materials is a significant safety concern due to the high risk of accidents. This study presents a comprehensive modeling and evaluation of the critical speed of railway tank cars by considering the interaction between two key parameters: track geometry (a range of curve radii from 250 meters upwards) and the liquid filling percentage of the tank (at three distinct levels). The system was simulated using the multi-body dynamic method in the UM software, and the dynamic behavior of the liquid inside the tank was modeled using the equivalent pendulum model. The results of the parametric analysis indicate that the critical speed of the railcar demonstrates a linear increasing trend with an increase in the curve radius, while it shows an inverse and non-linear relationship with the liquid filling percentage. Further analysis suggests that the combined effect of these two factors on railcar stability is considerable. In low-radius curves, the increased fluid mass leads to a significant decrease in critical speed. This phenomenon persists in large-radius curves as well, even with higher allowable speeds, making precise management essential. The findings of this research emphasize the necessity of revising safety standards and designing control protocols based on real-time track conditions and tank filling levels. The results indicate that the critical speed in a 250-meter curve with 95% filling is 30 m/s, while increasing the radius to 1000 meters and reducing filling to 20% raises it to 62 m/s.

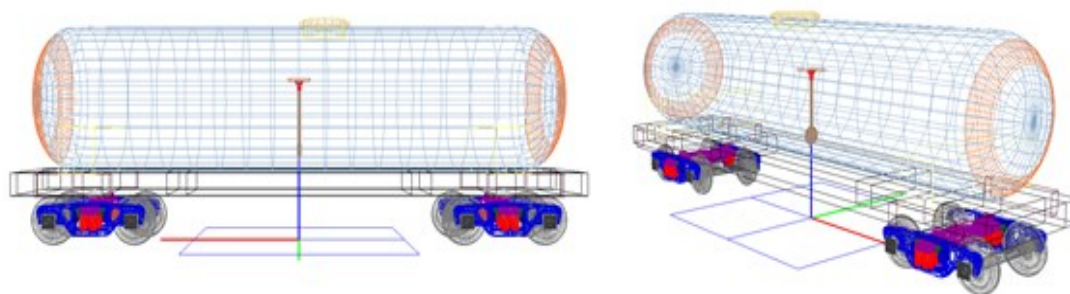
Keywords: Tank wagon; Critical speed; Dynamic stability; Fluid sloshing; Track geometry; Dynamic simulation.

۱- مقدمه

حمل و نقل ریلی مواد خطرناک، به دلیل مزایای چشمگیر اقتصادی و ظرفیت بالای جابه‌جایی، نقشی غیرقابل انکار در زنجیره تأمین جهانی ایفا می‌کند [۱، ۲]. با این حال، ماهیت ذاتی مواد حمل‌شده، این بخش را با ریسک‌های ایمنی قابل توجهی مواجه می‌سازد. حوادث مربوط به واگن‌های مخزن‌دار، به دلیل پتانسیل بالای انتشار مواد سمی و قابل اشتعال، پیامدهای فاجعه‌بار زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به همراه دارد که توجه محققان و نهادهای قانون‌گذار را به خود معطوف کرده است [۳]. لازم به ذکر است که پیچیدگی‌های هیدرودینامیکی پدیده تلاطم سیال و تأثیرات آن بر پایداری سازه‌ها، موضوعی گسترده و شناخته‌شده در علوم مهندسی است [۴]. از این رو، درک و پیش‌بینی دقیق رفتارهای دینامیکی واگن‌های مخزن‌دار در شرایط عملیاتی مختلف، به یک اولویت کلیدی در راستای ارتقای ایمنی و پایداری سیستم‌های ریلی تبدیل شده است. پدیده حرکت سیال درون مخزن با تلاطم^۱، به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر دینامیک واگن‌های مخزن‌دار، به دلیل تغییر مرکز جرم و ایجاد نیروهای اینرسی اضافی، می‌تواند به طور چشمگیری بر پایداری واگن تأثیر بگذارد. مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم نمود: روش‌های تجربی و رویکردهای عددی. در زمینه مطالعات تجربی، محققان با استفاده از مدل‌های فیزیکی مقیاس کوچک و بزرگ، رفتارهای دینامیکی واگن‌های مخزن‌دار را در شرایط مختلف بهره‌برداری مورد بررسی قرار داده‌اند [۵، ۶]. برخی پژوهش‌ها نیز با ترکیب موفق رویکردهای تجربی و عددی، به اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی پرداخته و دقت آن‌ها را تأیید کرده‌اند [۷]. این روش‌ها، اگرچه قادر به ارائه داده‌های دقیق و معتبر هستند، اما به دلیل هزینه بالا، محدودیت‌های مقیاس‌گذاری و دشواری کنترل پارامترهای محیطی، دارای محدودیت‌هایی هستند. در مقابل، رویکردهای عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، به عنوان یک جایگزین کارآمد، امکان تحلیل جامع‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تری را فراهم آورده‌اند [۸]. از جمله مهم‌ترین این رویکردها، دینامیک چند جسمی^۲ است که در ترکیب با مدل‌های تحلیلی یا عددی برای شبیه‌سازی‌های زیادی در صنعت ریلی [۹] از جمله رفتار سیال

درون مخزن، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. این ترکیب‌سازی به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود؛ برای مثال، برخی محققان مدل دینامیک چند جسمی را با دینامیک سیالات محاسباتی^۳ کوپل کرده‌اند تا نتایج این بررسی‌ها را توانمند بسنجند. [۱۱] یکی از موارد قابل توجه در حوزه صنعت ریلی، بررسی پایداری واگن در قوس است [۱۲]، در حالی که برخی دیگر از مدل‌های معادل بهبودیافته^۴ برای شبیه‌سازی نیروها و گشتاورهای ناشی از تلاطم در جهت‌های جانبی و طولی بهره برده‌اند [۱۳]. در این شبیه‌سازی‌ها، غالباً از روش‌هایی مانند حجم سیال^۵ برای ردیابی دقیق سطح آزاد سیال استفاده می‌شود [۷]. با این حال، در اغلب این مطالعات، به جای تحلیل یک طیف وسیع از شرایط عملیاتی، بر روی چند حالت مشخص تمرکز شده است. سرعت بحرانی به عنوان یک معیار مهم برای ارزیابی پایداری واگن، همواره مورد توجه بوده است. تحقیقات پیشین تأثیر پارامترهایی مانند هندسه مسیر [۱۴]، میزان پرشدگی مخزن [۱۵] و انواع خاص مخازن [۱۶] را به صورت مجزا بر روی سرعت بحرانی نشان داده‌اند. اما، تحلیل تأثیر همزمان و متقابل طیف وسیعی از شعاع‌های قوس و درصدهای پرشدگی سیال، به خصوص در مقیاسی که بتواند به طور مستقیم به استانداردهای عملیاتی کمک کند، در مطالعات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی انجام شده است. با توجه به اهمیت پایداری واگن‌های مخزن‌دار، در مقالات معتبر، بررسی همزمان هندسه مسیر (مانند شعاع قوس) و پرشدگی مخزن به عنوان چالش حل‌نشده پیشنهاد شده است [۱۷]. این شکاف ناشی از تمرکز مطالعات پیشین بر عوامل جداگانه، مانند اثر پرشدن بر سرعت هانتینگ و یا اثر هندسه بر خروج از خط، بدون تحلیل متقابل است. ریشه پیچیدگی این موضوع در عوامل فنی مانند مدل‌سازی برهم‌کنش سیال-سازه (FSI) پیچیده، هزینه محاسباتی بالا در شبیه‌سازی‌های همگام شده، و دشواری اعتبارسنجی با داده‌های تجربی نهفته است [۱۸]. ادعای نوآوری این مقاله با شواهد از ادبیات پشتیبانی می‌شود، جایی که محققان به بررسی ناقص همزمان اشاره کرده‌اند یا آن را برای مطالعات آینده پیشنهاد داده‌اند [۱۹].

^۴ Improved equivalent model^۵ Volume of Fluid - VOF^۱ sloshing^۲ Multi-Body Dynamics - MBD^۳ CFD



شکل ۱- تصویر مدل ساخته شده از واگن مخزن دار به همراه پاندول معادل بخشی پر شده در UM

کوتاه است، در حالی که شبیه‌سازی‌های مشابه با روش CFD، بسته به دقت مش‌بندی و مدل آشفتگی، معمولاً ساعت‌ها زمان محاسباتی نیاز دارند. این رویکرد، در مقایسه با روش‌های تجربی، مزایایی همچون کاهش هزینه و زمان شبیه‌سازی و امکان تحلیل دقیق اندرکنش میان اجزای مختلف سیستم را فراهم می‌آورد [۲۱]. به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی، نرم‌افزار ^۱UM به کار گرفته شده است که یک ابزار قدرتمند برای دینامیک چند جسمی محسوب می‌شود [۲۲].

۱-۲- مدل‌سازی واگن و سیال

مدل سه‌بعدی واگن مخزن دار شامل یک بدنه، دو بوژی و چهار محور چرخ است. پارامترهای اصلی این واگن، شامل جرم، ابعاد و ممان اینرسی، مطابق با مشخصات واقعی یک واگن باری استاندارد در جدول ۱ ارائه شده‌اند. از آنجایی که حرکت سیال درون مخزن، تأثیر قابل توجهی بر پایداری دینامیکی واگن دارد، شبیه‌سازی دقیق این پدیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده برای واگن در نرم‌افزار

UM		
پارامتر	مقدار	واحد
نوع بوژی	۱۸-۱۰۰	-
وزن بدنه	۲۷,۲	تن
فاصله محورها در بوژی	۱,۸۵	متر
فاصله مراکز بوژی‌ها	۹,۴	متر
فاصله کوپلینگ	۱۳,۹۲	متر
شعاع چرخ	۰,۴۷۵	متر
شعاع تانک	۱,۵	متر
سفتی تعلیق اولیه (طولی/عرضی)	۱,۲	MN/m

این پژوهش، با تمرکز بر شبیه‌سازی دینامیکی سه‌بعدی و مدل دینامیک چند جسمی، با هدف مدل‌سازی و ارزیابی جامع سرعت بحرانی واگن‌های مخزن دار در شرایط عملیاتی واقع‌گرایانه انجام شده است. نوآوری‌های اصلی این تحقیق در موارد ادامه خلاصه می‌شود؛ الف) بررسی اندرکنش همزمان؛ برخلاف مطالعات گذشته که به بررسی مجزای تأثیر هندسه مسیر یا پرشدگی مخزن پرداخته‌اند، این تحقیق تأثیر متقابل و همزمان طیف گسترده‌ای از شعاع‌های قوس و درصد پرشدگی‌های سیال را تحلیل می‌کند. ب) گستره وسیع پارامتریک: استفاده از داده‌های شبیه‌سازی در طیفی وسیع‌تر از شرایط (شعاع‌های قوس از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر و سه درصد پرشدگی) که به درک کامل‌تر و جامع‌تری از رفتار سیستم در مقیاس‌های عملیاتی منجر می‌شود. ج) کاربرد عملی: ارائه یافته‌هایی که به صورت مستقیم به بهبود استانداردهای ایمنی، طراحی پروتکل‌های ایمنی پویا و تدوین دستورالعمل‌های کنترل سرعت برای واگن‌های مخزن دار در مسیرهای قوسی کمک می‌کند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش، به درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های خروج از خط ناشی از تلاطم سیال در واگن‌های مخزن دار کمک کرده و مبنایی علمی برای افزایش ایمنی حمل و نقل ریلی فراهم سازد.

۲- روش‌شناسی تحقیق

در این مطالعه، برای تحلیل جامع رفتار دینامیکی واگن مخزن دار در شرایط مختلف عملیاتی، از یک رویکرد شبیه‌سازی دینامیکی سه‌بعدی استفاده شده است [۲۰]. از نظر کارایی محاسباتی، رویکرد پیشنهادی مزیت قابل توجهی دارد؛ به‌گونه‌ای که زمان اجرای هر سناریو در نرم‌افزار UM بسیار

^۱ Universal Mechanism

سفتی تعلیق ثانویه	۰,۷	MN/m	طول ثابت قبل و بعد از ورود به قوس	L	200 (m)
ضریب میرایی اصطکاکی	۳۰	kNs/m	ضریب اصطکاک	μ	0.25
I_x	۲۱۸۴۰	kg. m ²			
I_y	۷۴۷۸۵	kg. m ²			
I_z	۸۷۶۶۶	kg. m ²			

پارامتر کانت^۲ (شیب ریل) در واقعیت وابسته به شعاع قوس (R) و سرعت طراحی (V) است و بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\text{Cant} = \frac{V^2 \times b}{g \times R} \quad (1)$$

که b فاصله گنج ریل (معمولاً ۱,۴۳۵ متر در استاندارد ایران) و g شتاب گرانش است. [۲۳] با این حال، در این مطالعه، برای ساده سازی مدل و تمرکز بر تأثیر همزمان شعاع قوس و درصد پرشدگی، از مقدار ثابت ۰,۰۹ (متر) معادل ۹۰ میلی متر، بر اساس استاندارد UIC برای سرعت های متوسط حدود ۸۰-۱۰۰ کیلومتر بر ساعت (در تمام قوس ها استفاده شد. این مقدار، که در جدول ۳ آورده شده، در مطالعات مشابه برای تحلیل پارامتریک رایج است و خطای قابل قبولی (کمتر از ۱۰٪) در پیش بینی سرعت بحرانی ایجاد می کند. در تحقیقات آینده، مدل سازی پویای کانت بر اساس سرعت واقعی می تواند دقت را افزایش دهد.

تصاویر مسیرهای ایجاد شده با زاویه قوس ۶۰ درجه و اندازه شعاع های ایجاد شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. طول مسیر کلی، مطابق با شعاع قوس و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید تا امکان پایداری واگن قبل و بعد از ورود به قوس فراهم شود.

$$L = R \cdot \theta = R \times 1.5708 \quad (2)$$

در جدول ۴ طول کلی مسیر و محاسبه طول قوس های به کار رفته، آورده شده است. در این جدول قسمت های متغیر شبیه سازی مسیر بیان گردیده است. در مدل سازی مسیر، مسیر ریلی شامل کلوتوئید ورودی (P1=60 متر)، قوس دایره ای ثابت θ با $S = R \cdot \theta$ یا ۱.04 $\approx \theta$ رادیان یا ۶۰ درجه، و کلوتوئید خروجی (P2=60 متر) است. رابطه (۲) برای طول بخش دایره ای (S) استفاده شد، که برای R=250 متر، S=260 متر

I_x ، I_y و I_z ممان اینرسی های واگن در جهات اصلی هستند. به منظور شبیه سازی اثرات دینامیکی ناشی از تلاطم سیال، از مدل پاندول معادل^۱ که یک رویکرد ساده سازی شده اما مؤثر است، استفاده گردید. این مدل، نیروی اینرسی سیال را با یک پاندول که داخل مخزن قرار گرفته، شبیه سازی می کند. پارامترهای این پاندول، شامل جرم و موقعیت مرکز جرم، بر اساس سه سطح پرشدگی ۲۰، ۵۰ و ۹۵ درصد محاسبه و در جدول ۲ آورده شده اند. همچنین شکل ۱، تصویر مدل ساخته شده از واگن مخزن دار به همراه پاندول در نرم افزار UM قرار داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای بدست آمده برای پاندول

درصد پرشدن (%)	m_0/m_t	h_0/R	I_p/R
20	0.839	1.545	0.907
50	0.542	1.181	0.650
95	0.096	0.635	0.266

۲-۲- مدل سازی مسیر و شرایط شبیه سازی

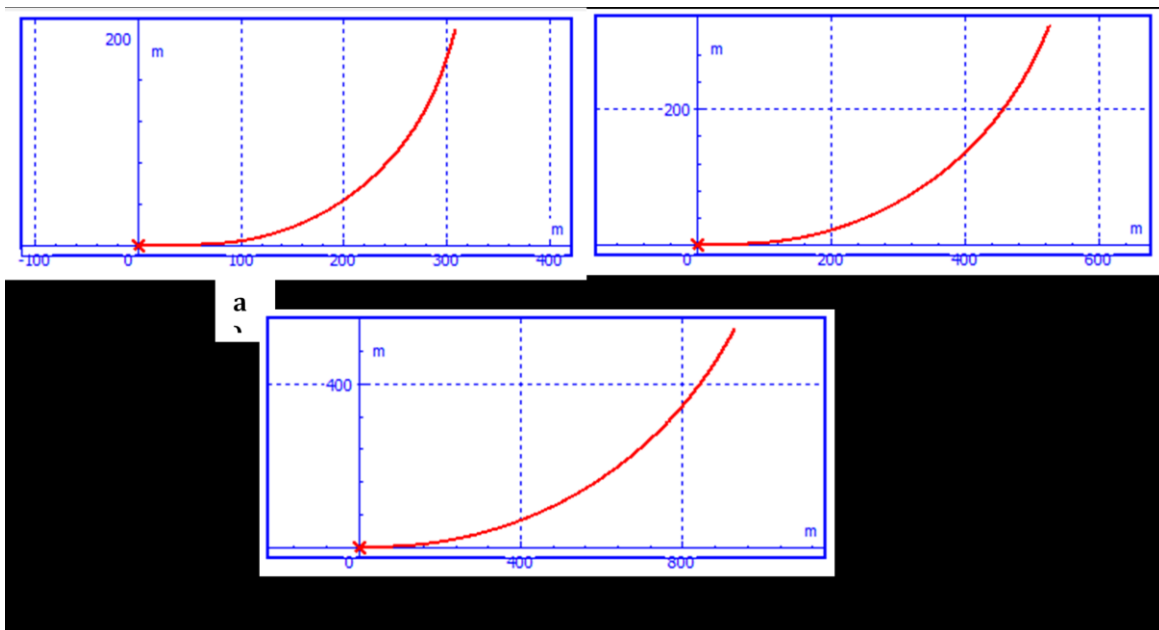
برای ارزیابی سرعت بحرانی واگن، سه مسیر با شعاع های قوس مختلف طراحی گردید. این شعاع ها ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شدند تا طیف گسترده ای از شرایط عملیاتی واقعی را پوشش دهند. مشخصات ثابت مسیر، شامل کانت و ضریب اصطکاک، در جدول ۳ مشخص شده است.

جدول ۳- مشخصات ثابت پارامتریک مسیر قوس ایجاد شده

UM در		
اندازه	نماد	پارامتر
0.09 (m)	h	کانت

² Cant

¹ Equivalent Pendulum Model



شکل ۲- مسیرهای شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار UM شامل کلوئید ورودی، قوس دایره‌ای و کلوئید خروج (الف): شعاع ۲۵۰ متر، ب: شعاع ۵۰۰ متر، ج: شعاع ۱۰۰۰ متر

وسیله نقلیه بدون بروز ناپایداری‌های جانبی قادر به حفظ حرکت پایدار است. اندازه سرعت بحرانی برای یک واگن در شرایط مختلف سیر ممکن است تغییر نماید. معیارهای متنوعی مانند نادال و واین‌استاک توسعه یافته‌اند که می‌توان از نسبت‌های آن‌ها در استانداردهای مختلف برای محاسبه سرعت بحرانی استفاده کرد. همچنین، در راهنمای نرم‌افزار UM، دو روش معرفی شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان سرعت بحرانی وسیله را به صورت عددی و از طریق انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های کامپیوتری تخمین زد. برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار UM، نتایج با مطالعات پیشین مقایسه گردید. به طور خاص، سرعت بحرانی محاسبه شده در شرایط پایه (پرشدهگی ۵۰٪) برابر ۳۴ m/s است که با سرعت هانتینگ بحرانی گزارش شده است [۲۶]. در این پژوهش ابتدا مدل پایه مورد ارزیابی سرعت هانتینگ واقع شد و با ۳۴٫۷۲ m/s بدست آمده نسبت به پژوهش فوق الذکر، با خطای کمتر از ۲٪. همخوانی دارد. در شکل ۳ این موضوع نشان داده شده است. این مطالعه از مدل دینامیکی مشابه برای تحلیل پایداری واگن مخزن دار استفاده کرده و پایداری را بر اساس معیار نادال^۱ و ضریب باربرداری^۲ ارزیابی نموده است. همچنین، روش

است. طول کلی مسیر (شامل کلوئید ورودی ۶۰ متر + قوس دایره‌ای ۲۶۰ متر + کلوئید خروجی ۶۰ متر) برابر ۳۸۰ متر است. این طراحی بر اساس استانداردهای UIC و مقررات راه‌آهن ایران (با کلوئید برای انتقال آرام) انتخاب گردید. [۲۴] شکل ۲ نمایش مسیر دارای قوس و کلوئید است.

جدول ۴- مشخصات متغیر قوس و طول کلی مسیر ایجاد

شده در UM		
طول مسیر (m)	طول قوس (m)	شعاع قوس (m)
۳۸۰	۲۶۰	۲۵۰
۶۳۰	۵۲۴	۵۰۰
۱۱۰۰	۱۰۴۷	۱۰۰۰

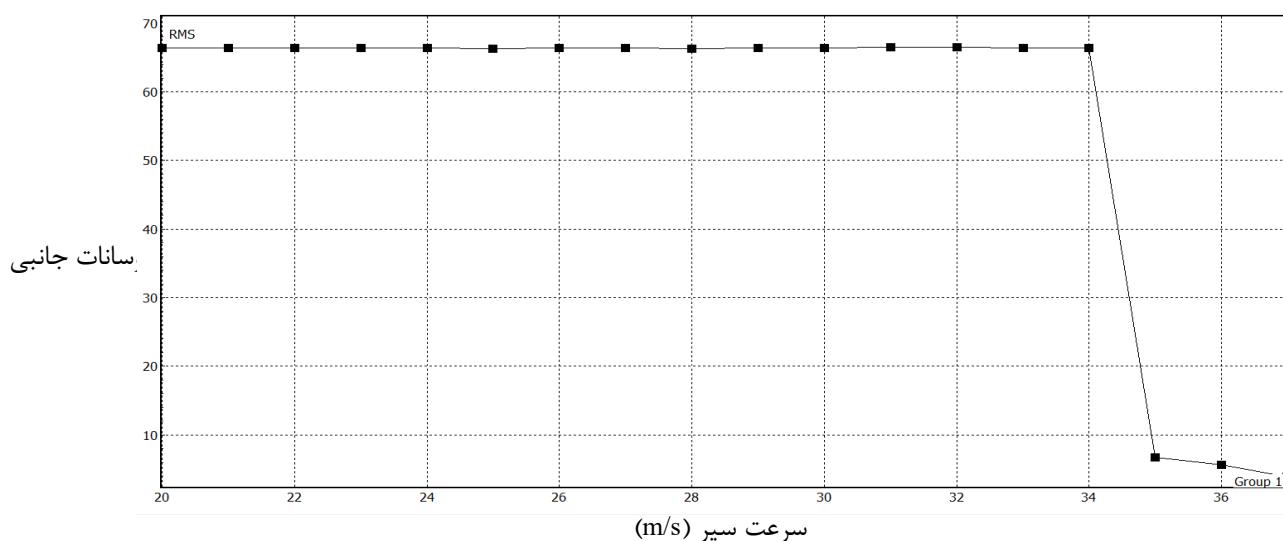
۳- روش‌های ارزیابی سرعت بحرانی و تئوری

بررسی موضوع

در بسیاری از مقالات و پژوهش‌ها، معیارهای متعددی برای تعیین پایداری یک وسیله نقلیه ریلی وجود دارد. یکی از این معیارها که امروزه بیشتر از همه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد سرعت بحرانی یا همان حداکثر سرعتی است که در آن

^۲ unloading quotient

^۱ Nadal's criterion



شکل ۳- نمودار تغییرات (RMS) نوسانات جانبی نسبت به سرعت سیر واگن ۵۰٪ پر شده در قوس ۲۵۰ متری

استفاده قرار گرفته است [۲۲]. به عنوان مثال در شکل ۳ نمونه‌ای از این نمودار قرار گرفته است. همانطور که در نمودار شکل (۳) مشخص گردیده است، تغییرات (RMS) نوسانات جانبی بر حسب میلی‌متر در سرعت ۳۴-۳۵ متر بر ثانیه تغییرات چشمگیری داشته است. این نرخ تغییرات نشان دهنده خروج از ریل در سرعت ۳۵ متر بر ثانیه بوده است. در شکل ۴ تصویر نتیجه گرفته شده قرار دارد.

۴- بررسی توانان سرعت بحرانی تحت اثر پرشوندگی در قوس‌ها

```
6:09:59 PM
Experiment starts at:
Family of alternatives: 50%
Identifiers:
v0 = 34
Bogie1.v0 = 34
Bogie2.v0 = 34

6:10:29 PM
Experiment succeed
-----
6:10:31 PM
Experiment starts at:
Family of alternatives: 50%
Identifiers:
v0 = 35
Bogie1.v0 = 35
Bogie2.v0 = 35

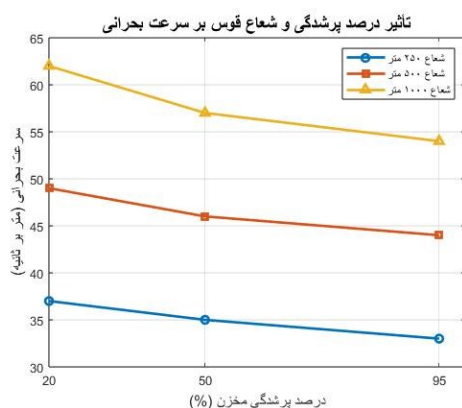
6:10:49 PM
Experiment succeed
[Error]: Wheelset 1 is out of rail.
[Error]: Calculation is interrupted
```

شکل ۴- تصویر خلاصه نتایج شبیه‌سازی، به روش آنالیز پیشرفته، سیر واگن ۵۰٪ پر شده در قوس ۲۵۰

افزایش پلکانی سرعت و بررسی RMS نوسانات جانبی، که در این پژوهش به کار رفته، با رویکردهای اعتبارسنجی شده در مطالعه مذکور سازگار است. این اعتبارسنجی، اطمینان از دقت مدل در پیش‌بینی سرعت بحرانی تحت تأثیر هندسه مسیر و پرشدگی را تضمین می‌کند. در پژوهش‌های دیگر نیز مورد استفاده بوده است [۲۷].

۳-۱- روش‌های عددی تخمین سرعت بحرانی

به طور کلی دو روش پرکاربرد برای تخمین عددی سرعت بحرانی قابل استفاده است. الف- استفاده از ناهم‌واری جانبی منفرد و ب- افزایش پلکانی سرعت و بررسی (RMS) نوسانات جانبی. در روش اول یک مسیر صاف به همراه یک ناهم‌واری جانبی منفرد در نظر گرفته می‌شود سپس با اجرای آزمایش‌های عددی و بررسی پاسخ دینامیکی سیستم، سرعت بحرانی تخمین زده می‌شود. به‌منظور کمی‌سازی پارامتر نوسانات جانبی، از شاخص‌هایی نظیر جابه‌جایی جانبی محور چرخ‌ها نسبت به محور ریل و توان نوسانات (بر پایه محاسبه مقدار RMS) استفاده می‌گردد. این رویکرد امکان شناسایی آستانه سرعت بحرانی و تحلیل حساسیت سیستم به تغییرات پارامترهای عملیاتی را فراهم می‌سازد. روش دوم افزایش سرعت با پله‌های متفاوت و انتخابی است که از یک سرعت مطمئن شروع شده و تا زمانی که قطار از ریل خارج شود ادامه می‌یابد، این روش به دلیل توانایی در استفاده از مسیرهای مختلف و به خصوص برای بررسی قوس‌ها در این پژوهش مورد



شکل ۵- نمودار تغییر سرعت‌های بحرانی برای درصد‌های ۲۰، ۵۰ و ۹۵ درصد پرشده در قوس‌ها با شعاع‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری

۴-۲- تحلیل و بحث

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در تمامی شعاع‌های قوس بررسی‌شده، افزایش درصد پرشدگی به صورت غیرخطی باعث کاهش سرعت بحرانی می‌شود. این کاهش ناشی از افزایش جرم متحرک سیال و جابه‌جایی مرکز جرم بوده که پایداری واگن را در برابر نیروهای جانبی تضعیف می‌کند. به طور مثال، در قوس ۲۵۰ متری، با افزایش پرشدگی از ۲۰٪ به ۹۵٪، سرعت بحرانی از ۳۶ m/s به ۳۲ m/s کاهش یافته است (حدود ۱۱٪ افت). در قوس ۱۰۰۰ متری نیز همین تغییر در پرشدگی، سرعت را از ۶۱ m/s به ۵۴ m/s کاهش می‌دهد (حدود ۱۱٫۵٪ افت). از سوی دیگر، تأثیر هندسه مسیر به شکل بارزی مشاهده می‌شود. در پرشدگی ثابت ۵۰٪، با افزایش شعاع قوس از ۲۵۰ متر به ۱۰۰۰ متر، سرعت بحرانی از ۳۴ m/s به ۵۷ m/s افزایش می‌یابد (حدود ۶۷٪ رشد). این پدیده ناشی از کاهش نیروی گریز از مرکز در قوس‌های ملایم‌تر است که رابطه‌ای معکوس با شعاع قوس دارد. تحلیل ترکیبی این دو پارامتر بیانگر یک اندرکنش پیچیده است: در قوس‌های کوچک، تغییر درصد پرشدگی حساسیت بیشتری در کاهش سرعت بحرانی ایجاد می‌کند. برای مثال، اختلاف سرعت بین پرشدگی ۲۰٪ و ۹۵٪ در قوس ۲۵۰ متری حدود ۴ m/s است، در حالی که همین اختلاف در قوس ۱۰۰۰ متری به ۷ m/s می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در قوس‌های بزرگ، پرشدگی مخزن همچنان یک فاکتور ایمنی مهم محسوب می‌شود.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در این بخش، ابتدا اثر پرشدن برای هر قوس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، سپس اثر قوس به تنهایی و در نهایت اثر قوس و میزان پرشدن به صورت توأمان بر سرعت بحرانی حرکت بیان خواهد شد. این تحلیل جامع، به درک عمیق‌تر از رفتار سیستم در شرایط عملیاتی مختلف کمک می‌کند.

۴-۱- اثر پرشدگی برای هر قوس

در این پژوهش، رفتار دینامیکی واگن مخزن‌دار برای سه درصد پرشدگی ۲۰، ۵۰ و ۹۵ درصد در سه مسیر با شعاع‌های قوس ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، روندهای زیر را نشان می‌دهد:

- قوس با شعاع ۲۵۰ متر:

با افزایش درصد پرشدگی از ۲۰٪ به ۹۵٪، سرعت بحرانی از ۳۷ متر بر ثانیه به ۳۳ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده افت پایداری سیستم در قوس‌های با شعاع کم است که به دلیل افزایش جرم سیال و اثرات دینامیکی ناشی از آن رخ می‌دهد.

- قوس با شعاع ۵۰۰ متر:

در این قوس، با افزایش درصد پرشدگی از ۲۰٪ به ۹۵٪، سرعت بحرانی از ۴۹ متر بر ثانیه به ۴۴ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. اگرچه در این شعاع، سرعت‌های مجاز بالاتر است، اما تأثیر پرشدگی بر کاهش سرعت بحرانی همچنان قابل توجه است.

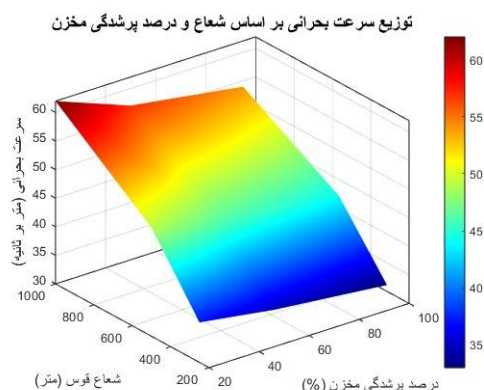
- قوس با شعاع ۱۰۰۰ متر:

در قوس با شعاع ۱۰۰۰ متر، با افزایش درصد پرشدگی از ۲۰٪ به ۹۵٪، سرعت بحرانی از ۶۲ متر بر ثانیه به ۵۴ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این روند تأیید می‌کند که حتی در مسیرهای با قوس بسیار ملایم، مدیریت درصد پرشدگی برای حفظ پایداری حیاتی است. جدول ۵ سرعت‌های بدست آمده بحرانی را در قوس‌های مختلف و شکل ۵ نمودار آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵- سرعت بحرانی با احتساب درصد پرشدن در قوس‌های مدل‌سازی شده

درصد پرشدن	قوس ۲۵۰ متر	قوس ۵۰۰ متر	قوس ۱۰۰۰ متر
۲۰٪	۳۶	۴۸	۶۲
۵۰٪	۳۴	۴۵	۵۷
۹۵٪	۳۰	۴۳	۵۴

شکل ۶ نمودار سه‌بعدی تغییر سرعت‌های بحرانی براساس تغییر درصد پرشدن مخزن‌ها و تغییر شعاع قوس را که در نرم افزار متلب ترسیم شده است نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودار سه‌بعدی تغییر سرعت‌های بحرانی براساس تغییر درصد پرشدن مخزن‌ها و تغییر شعاع قوس

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، تأثیر هم‌زمان هندسه مسیر و درصد پرشدگی مخزن بر سرعت بحرانی واگن‌های مخزن‌دار با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی سه‌بعدی بررسی شد. یافته‌های کمی و کیفی حاصل، بینش‌های ارزشمندی برای ارتقای ایمنی حمل‌ونقل ریلی فراهم ساخت. نتایج نشان داد که سرعت بحرانی واگن با افزایش شعاع قوس به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد و در مقابل، با افزایش درصد پرشدگی مخزن، کاهش غیرخطی را تجربه می‌کند. برای نمونه، در قوس ۲۵۰ متری، افزایش پرشدگی از ۲۰٪ به ۹۵٪ باعث کاهش سرعت بحرانی از ۳۶ m/s به ۳۲ m/s شد، در حالی‌که در قوس ۱۰۰۰ متری همین تغییر پرشدگی موجب کاهش سرعت از ۶۱ m/s به ۵۴ m/s گردید. همچنین، در پرشدگی ثابت ۵۰٪، افزایش شعاع قوس از ۲۵۰ به ۱۰۰۰ متر باعث رشد سرعت بحرانی از ۳۴ m/s به ۵۷ m/s شد. تحلیل نتایج بیانگر آن است که پایداری واگن به شدت تحت تأثیر این دو عامل قرار دارد. به ویژه در قوس‌های با شعاع کم، افزایش جرم سیال کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در سرعت بحرانی ایجاد می‌کند و این موضوع بر ضرورت مدیریت دقیق سرعت در مسیرهای تند تأکید دارد. حتی در قوس‌های بزرگ‌تر نیز، پرشدگی بالا می‌تواند اختلاف سرعت بحرانی تا ۷ m/s ایجاد کند که از دید ایمنی قابل

اغماض نیست. این یافته‌ها اهمیت طراحی پروتکل‌های ایمنی پویا را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از سامانه‌های هشدار هوشمند، سرعت مجاز واگن‌های مخزن‌دار را به‌صورت لحظه‌ای و متناسب با شعاع قوس و میزان پرشدگی تنظیم نمود تا از ناپایداری‌های بالقوه جلوگیری گردد.

هرچند سرعت‌های عملیاتی فعلی واگن‌های باری مخزن‌دار در خطوط ریلی ایران معمولاً بین ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر در ساعت در خطوط مستقیم و ۴۰ تا ۶۰ کیلومتر در ساعت در قوس‌ها است، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده پتانسیل افزایش سرعت در آینده است. با پیشرفت فناوری‌های ریلی، مانند قطارهای الکتریکی پرسرعت و سیستم‌های کنترل هوشمند، می‌توان سرعت حمل مواد استراتژیک و حساس را افزایش داد تا زمان انتقال کاهش یابد [۲۷] و ریسک‌های ایمنی مدیریت شود. این اطلاعات به مخاطبان، از جمله سیاست‌گذاران و مهندسان ریلی، کمک می‌کند تا استانداردهای ایمنی را برای سناریوهای آینده بهینه‌سازی کنند. پارامترهایی مانند ناهمواری ریل^۱ و اسلیپرهای بدون پشتیبانی، که تأثیر بسزایی بر سرعت بحرانی دارند، در تحقیقات آتی بررسی خواهند شد، زیرا تمرکز این مطالعه بر هندسه مسیر و پرشدگی مخزن بود.

با توجه به محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اثر پارامترهای فیزیکی سیال مانند ویسکوزیته و چگالی نیز بر سرعت بحرانی بررسی شود. همچنین بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر رفتار تلاطم و مقایسه آن با مدل پاندول معادل کمک کند. از سوی دیگر، مطالعه نقش شرایط عملیاتی نظیر ناهمواری‌های مسیر، ترمزگیری و شتاب‌گیری در حضور سیال متحرک می‌تواند تصویر کامل‌تری از پایداری دینامیکی واگن‌های مخزن‌دار ارائه دهد.

مراجع

- [1] D. Liu, C. Li, X. Tan, X. Lu and O. P. Malik, "Damping characteristics analysis of hydropower units under full operating conditions and control parameters: Accurate quantitative evaluation based on refined models," *Applied Energy*, vol. 292, 2021.
- [2] S. Yousefi, M. Naseri Taheri and M. Shahravi, "Analysis of longitudinal fluid sloshing in tank wagon," *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 225-238, 2019.
- [3] X. Zheng, L. Yu, Y. Ren, X. Li, B. Liang and J. Xi, "Modeling of Tank Vehicle Rollover Risk

¹ Irregularity

- [15] K. Gholamizadeh, D. Pamucar, S. Moslem, P. Basiri, D. Esztergár-Kiss and I. Mohammadfam, "Decoding rail derailments: Unraveling the weighted factors influencing safety and sustainability using the best-worst method," *Results in Engineering*, vol. 23, 2024.
- [16] M. M. Ziarani, M. J. Richard and S. Rakheja, "Optimisation of liquid tank geometry for enhancement of static roll stability of partially-filled tank vehicles," vol. 11, no. 2, pp. 155-173, 2004.
- [17] Ashtiani I.H. Safety investigation of partially filled railway tank cars. Montreal: Concordia University, 2018.
- [18] S. Rebouillat, D. Liksonov, "Fluid–structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches", *Computers & Fluids*, Vol. 39, No. 5, pp. 739-746, 2010.
- [19] I.H. Ashtiani, S. Rakheja, W. Ahmed, "Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. " *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*.vol. 233, No. 10, pp. 1023-1037, 2019.
- [20] José L. Escalona, Javier F. Aceituno, "Multibody simulation of railway vehicles with contact lookup tables", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 155, pp 571-582, 2019.
- [21] J. Dižo, M. Blatnický, J. Harusinec, A. Suchánek "Assessment of Dynamics of a Rail Vehicle in Terms of Running Properties While Moving on a Real Track Model. " *Symmetry*, vol.14, 2022.
- [22] V. Petrenko, "Simulation of Railway Vehicle Dynamics in Universal Mechanism Software", *Procedia Engineering*, Vol. 134, pp 23-29, 2016.
- [23] P. Chuadchim, C. Ngamkhanong, P. Aela, G. Jing, Sa. Kaewunruen. "Nonlinear buckling analysis of curved railway tracks considering unbalanced cant and train speed. " *Sci Rep* 15, 11062 (2025).
- [24] H. Molatefi,, A. Mazraeh, M. Shadfar and H. Yazdani, "Advances in Iran railway wheel wear management: A practical approach for selection of wheel profile using numerical methods and comprehensive field tests," *Wear*, pp. 97-110, 2019.
- [25] A. Nahidi; D. Younesian, "Novel control strategies for roll/pitch stabilization of tank wagons," *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 1, pp. 151-164, 2016.
- [26] Sh. Sadeghi; M. Shahravi, " Effect of Filling Level on the Dynamic Performance and Derailment Risk of a Tank Wagon on Curved Track", *International Journal of Railway Research*, vol. 13, no. 1, pp 17-26, 2026.
- [27] Assessment on Curved–Slope Combination Sections for Sustainable Transportation Safety," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, p. 906, 2025.
- [4] Zheng, Jh., Xue, MA., Dou, P. et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn* 33, 1089–1104 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7>
- [5] j. R. Adrian, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, pp. 261-304, 1991.
- [6] A. I. Raouf, "Road Tanker Dynamics Interacting with Liquid Sloshing Dynamics," in *Recent Trends in Applied Nonlinear Mechanics and Physics*, Belhaq, M. (eds), 2018.
- [7] Q Wang, W Qi, G Zheng, W Xu, H Yu, "Liquid sloshing in a tank vehicle: A numerical and experimental investigation with baffle configurations", *Measurement*, Vol. 234, 2024, 114806, ISSN0263-2241,
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114806>.
- [8] S. Rebouillat and D. Liksonov, "Fluid–structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches," *Computers & Fluids*, vol. 39, no. 5, pp. 739-746, 2010.
- [9] Li, Z. P. and Wang, X. F. and Pan, Y. M. and Ding, Y. and Liu, P. F. and Deng, Z. G., "Contribution of Suspension Bogies' Aerodynamic Loads to the Dynamic Characteristics of a High-temperature Superconducting Maglev Train Running under Crosswind", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 18, No. 6. 2025.
- [10] X. Li, Q. Xiao, Y. Zhou, D. Ning, A. Incecik, R. Nicoll, A. McDonald, D. Campbell, "Coupled CFD-MBD numerical modeling of a mechanically coupled WEC array", *Ocean Engineering*, Volume 256, 2022.
- [11] N. Xu, C. Yang and Z. Ren, "Effect of liquid sloshing in lateral and longitudinal directions on railway tank cars based on an improved equivalent model," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 237, no. 4, pp. 601-616, 2023.
- [12] Rahmati-Alaei, A., Sharavi, M. & Samadian Zakaria, M. "Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method". *Multibody Syst Dyn* 50, 45–69 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s11044-019-09715-y>
- [13] Xu N, Yang C, Yang G, Ren Z. " Effect of liquid sloshing in lateral and longitudinal directions on railway tank cars based on an improved equivalent model. " *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2023;237(4):601-616.
doi:10.1177/14644193231195146
- [14] H. Andreas, E. Bridget , T. Dirk, C. Frederic, G. Gerald, Z. Manfred and K. Sönke, "Describing and assessing track geometry quality," *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 52, no. 1, pp. 189-206, 2014.