

วิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์สะพานรถไฟ

Train Track Bridge Dynamic Interaction

ชัยพล ยุวชิต¹ ชาญชล วีรปัญญา² และ ชยต์ม งามโชนง³^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ระบบขนส่งทางรางถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาการจราจรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการขนส่งมวลชนอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ระบบรางไม่ได้จำกัดอยู่เพียงโครงสร้างทางรถไฟเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงสะพานและองค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งต้องรองรับแรงกระทำจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ เช่น แรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือน การศึกษาพลศาสตร์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟ ราง และสะพานจึงมีความจำเป็นต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน การวิเคราะห์ที่แม่นยำช่วยให้ออกแบบระบบที่รองรับแรงกระทำได้อย่างเหมาะสม ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และเพิ่มความปลอดภัยในการให้บริการระบบรางระยะยาว

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์เชิงพลศาสตร์ระหว่างรถไฟ ทางรถไฟ และสะพานสำหรับระบบรถไฟความเร็วสูง โดยมุ่งเน้นผลกระทบจากการเสียแนวของรางในแนวตั้งและแนวราบ (Vertical และ Lateral Misalignment) ที่มีต่อพฤติกรรมการสั่นของสะพาน ความเสี่ยงต่อการตกราง และความสะดักสบายของผู้โดยสาร ผ่านการจำลองแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม Universal Mechanism โดยสะพานถูกจำลองเป็นคานาสองช่วง ยาวรวม 96 เมตร ร่วมกับแบบจำลองรถไฟความเร็วสูงที่เคลื่อนที่ผ่านรางจำลองแบบไม่มีมวล (massless rail) กรณีศึกษาครอบคลุมช่วงความเร็วตั้งแต่ 100–360 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นและระดับการเสียแนวของรางมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการโก่งตัวของสะพาน ความเสี่ยงต่อการป็นรางของล้อ (L/V Ratio) และ ดัชนีความสะดักสบาย (Ride Comfort Index) อย่างชัดเจน ซึ่งผลลัพธ์สามารถนำไปใช้ประกอบการกำหนดความเร็วจำกัดและมาตรฐานความเรียบรอยของรางในระบบรถไฟความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : สะพานรถไฟ, ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่าง รถไฟ รางรถไฟและสะพาน, รถไฟความเร็วสูง, การเสียแนวของราง, ความเสี่ยงต่อการตกราง

Abstract

Rail transport systems are considered critical infrastructure that play a significant role in alleviating traffic congestion and reducing environmental impacts, particularly by enabling efficient mass transportation. However, the railway system is not limited to just the track structures—it also includes bridges and other components that must withstand dynamic forces generated by train movement, such as impact and vibration forces. Therefore, studying the dynamic interaction between trains, tracks, and bridges is essential for developing efficient and sustainable infrastructure. Accurate analysis enables the design of systems that can adequately accommodate dynamic loads, reduce maintenance costs, and enhance the long-term safety of rail services.

This article presents a dynamic interaction analysis between a high-speed train, railway track, and bridge, with a focus on the effects of vertical and lateral rail misalignments on bridge vibration behavior, derailment risk, and passenger comfort. A 3D simulation is performed using the Universal Mechanism software, in which the bridge is modeled as a two-span beam with a total length of 96 meters. The high-speed train moves over a massless rail model. The case study covers a speed range from 100 to 360 kilometers per hour. The results indicate that increasing train speed and the severity of track irregularities significantly influence the bridge's deflection behavior, L/V ratio, and Ride Comfort Index. These findings can be applied to determine appropriate speed limits and track smoothness standards for high-speed rail systems effectively.

Keywords: train bridge, train track bridge interaction, high speed train, rail misalignment, derailment risk

1 บทนำ

ระบบขนส่งทางรางถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากสามารถรองรับการขนส่งผู้โดยสารและสินค้าในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความแออัดของการจราจรบนถนน และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเมื่อเทียบกับการขนส่งทางบกหรือทางอากาศ อย่างไรก็ตาม ระบบรางมีความซับซ้อนมากกว่าที่เห็น เพราะนอกจากรางรถไฟแล้ว ยังรวมถึงโครงสร้างต่าง ๆ เช่น สะพานและอุปกรณ์รองรับอื่น ๆ ซึ่งต้องสามารถรองรับแรงกระทำจากการเคลื่อนที่ของรถไฟได้อย่างปลอดภัย

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านรางและสะพาน จะเกิดปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ที่สำคัญระหว่างตัวรถกับโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงแรงกระแทก แรงสั่นสะเทือน และแรงกดที่ส่งผลโดยตรงต่อความมั่นคงและอายุการใช้งานของระบบ หากไม่มีการวิเคราะห์และออกแบบที่เหมาะสม อาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ความเสียหายซ้ำซ้อน และความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุในระยะยาว

ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบรถไฟ ราง และสะพาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองสามมิติ ความแม่นยำสูง เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกของระบบรถไฟ-ราง-สะพานในกรณีการเคลื่อนที่ในแนวตรง โดยไม่พิจารณาความสามารถในการโค้งของตัวรถ การจำลองใช้ซอฟต์แวร์ Universal Mechanism ซึ่งเชี่ยวชาญด้านระบบกลไกหลายตัว (multibody dynamics) และสามารถเชื่อมโยงกับข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัด (FEM) ของสะพาน เพื่อให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด

วิธีการนี้ช่วยลดความยุ่งยากและต้นทุนจากการทดลองจริง เพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเร็วของรถไฟ น้ำหนักบรรทุก หรือคุณลักษณะทางวิศวกรรมของสะพาน ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางใหม่ในการออกแบบและวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานระบบรางในระยะยาวอย่างมีประสิทธิภาพ

2 การทบทวนวรรณกรรม

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

2.1.1 แบบจำลอง 2 มิติ

Zhang et al. (2019) ได้สรุปพัฒนาการของการศึกษาปฏิสัมพันธ์เชิงพลวัตระหว่างรถไฟ-สะพาน (Train-Bridge Dynamic Interaction: TBDI) ซึ่งเป็นหัวข้อสำคัญในวิศวกรรมรางมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 โดยเน้นว่าแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสะพาน และในทางกลับกัน ความสั่นสะเทือนจากโครงสร้างก็ส่งผลการตอบสนองของตัวรถไฟเช่นกัน

แบบจำลองทางพลศาสตร์ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องจากแบบแรงคงที่ (MCFM) และแรงฮาร์โมนิก (MHFM) ไปสู่แบบจำลองมวลเคลื่อนที่ (MM) และแบบสปริง-แดมป์-มวล (MSDMM) ซึ่งเริ่มสะท้อนพฤติกรรมจริงของระบบมากขึ้น จนกระทั่งแบบจำลองรถสองเพลลา (TAVBM) และแบบจำลอง TBDI สมัยใหม่ที่ผนวก Finite Element Method (FEM) และ Multi-Body Dynamics (MBD)

ในปี 1995 Zhai et al. ได้นำเสนอแบบจำลอง Train-Track-Bridge Dynamic Interaction Model (TTBDIM) ซึ่งพิจารณาการทำงานร่วมกันของรถไฟ ราง และสะพานอย่างครบถ้วน ครอบคลุมทั้งผลกระทบจากแรงไดนามิก ดัชนีความสบายของผู้โดยสาร (เช่น Sperling Index) ความเร็ววิกฤต ความเสี่ยงจาก resonance และอายุการใช้งานของโครงสร้าง รวมถึงนำการทดลองภาคสนามมาประเมินความแม่นยำของแบบจำลองด้วย

TTBDIM ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือน การควบคุมแรงสั่น และการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยเฉพาะในงานวิศวกรรมรถไฟความเร็วสูงของจีน บทความยังเสนอแนวทางพัฒนาต่อ เช่น แบบจำลอง 3 มิติ และการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบ เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

2.1.2 ผลกระทบรถไฟความเร็วสูง

Kedia et al. (2023) ได้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของสะพานคอนกรีตผสมเหล็กที่รองรับรถไฟความเร็วสูง LHB โดยวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน เช่น ความถี่ธรรมชาติ การเร่ง การกระจัด และตัวประกอบผลกระทบเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Impact Factor) รวมถึงประเมินความสะดวกสบายของผู้โดยสารด้วย Sperling's Ride Index และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมาตรฐาน ISO 2631

ระบบรถไฟจำลองด้วยแบบจำลอง Multibody Dynamics ที่มี 10 องศาอิสระ ขณะที่รางและสะพานจำลองเป็นคานาออยเลอร์แบบแบ่งส่วน โดยคำนึงถึงการเชื่อมโยงแบบยืดหยุ่นและแรงที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและราง การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์ผลของความเร็วรถไฟและคุณสมบัติโครงสร้างสะพานต่อพฤติกรรมการสั่นสะเทือนและความเสถียร

ผลการวิจัยพบว่าการเดินทางด้วยความเร็วสูง โดยเฉพาะเมื่อเข้าใกล้หรือเกินความเร็ววิกฤต อาจกระตุ้นการสั่นพ้องและเพิ่มแรงสั่นสะเทือนที่กระทบต่อความมั่นคงของสะพาน แม้สะพานคอมโพสิตจะสามารถลดแรงบางส่วนได้ แต่โครงสร้างเดิมอาจต้องปรับปรุงเพื่อรองรับสภาวะโหลดใหม่ การศึกษานี้จึงมีความสำคัญต่อการบำรุงรักษาสะพานที่มีอยู่ และเป็นแนวทางในการออกแบบสะพานใหม่ให้รองรับระบบรางความเร็วสูงอย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.3 แบบจำลอง 3 มิติ

Xu and Zhai (2019) ได้พัฒนาแบบจำลองสามมิติของระบบรถไฟ-ราง-สะพาน โดยผสมผสานข้อดีของวิธีเชื่อมโยงและแยกส่วน พร้อมใช้สมมติฐานการสัมผัสแบบแข็ง (rigid contact) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการคำนวณ โมเดลสามารถวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือน การเร่ง และการเสียรูปของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำ ผลการศึกษาแสดงว่าแบบจำลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของระบบ โดยเฉพาะเมื่อรถไฟวิ่งด้วยความเร็วสูง และเหมาะสมสำหรับประเมินโครงสร้างสะพานที่มีข้อจำกัดด้านแรงสั่นสะเทือน นอกจากนี้ยังพบว่าสมมติฐาน rigid contact ช่วยลดเวลาคำนวณลงได้โดยไม่

สูญเสียความแม่นยำในการวิเคราะห์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานออกแบบระบบรางสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.4 การศึกษาความปลอดภัยของระบบรถไฟความเร็วสูง

Samavedam et al. (1996) ศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนด้านข้างของราง (track lateral shift) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของรถไฟความเร็วสูง โดยพบว่าการเคลื่อนอาจเกิดแบบสะสมจากแรงซ้ำ หรือเกิดฉับพลันเมื่อรางรับแรงด้านข้างเกินขีดจำกัด งานวิจัยรวบรวมแนวทางจากหลายประเทศ เช่น ฝรั่งเศส และญี่ปุ่น พร้อมเสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟร่วมกับแบบจำลองราง โดยใช้ซอฟต์แวร์ SYSSIM เพื่อประเมินแรงที่ล้อกระทำต่อรางและพฤติกรรมการโก่งตัวถาวร รายงานยังเสนอเกณฑ์ Track Shift Safety Criterion เพื่อใช้กำหนดความเร็วรถไฟ การออกแบบราง และเงื่อนไขการบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ

2.1.5 ความเสถียรของการโดยสารบนรถไฟความเร็วสูงที่วิ่งผ่านสะพาน

Kargarnovin et al. (2005) ศึกษาความสบายในการโดยสารของรถไฟความเร็วสูงขณะวิ่งผ่านสะพาน โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นที่รวมระบบยานพาหนะ ราง และสะพานเข้าด้วยกัน พร้อมพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความแข็งและค่าหน่วงของระบบกันสะเทือน ความแข็งของรางและบัลลาสต์ และการเสียแนวของราง (track irregularity)

ผลการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีคาน Timoshenko และวิธี Galerkin พบว่า การเสียแนวของราง (แสดงด้วย PSD) มีผลกระทบต่อความสบายของผู้โดยสารมากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงความเร็วสูง นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับค่าความแข็งและ damping ของระบบกันสะเทือนให้เหมาะสมสามารถลดแรงสั่นสะเทือนและปรับปรุงค่าดัชนีความสบาย (เช่น Sperling Index) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ความยืดหยุ่นของจุดรองรับสะพานก็ส่งผลต่อความสบายเช่นกัน โดยสะพานที่รองรับได้แข็งจะช่วยลดความไม่สบายของผู้โดยสารได้ดีกว่า

3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ปฏิสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ในโมเดล

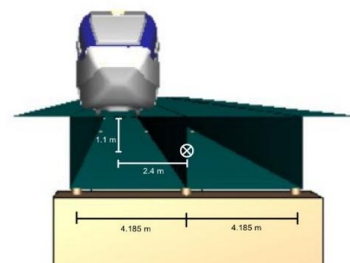
ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติของระบบรถไฟ-ราง-สะพาน โดยใช้โปรแกรม Universal Mechanism ซึ่งมีความสามารถในการจำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบหลายองศาอิสระแบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ตัวรถไฟ โบกี้ ล้อ ราง และสะพาน โดยแต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดดังนี้

ตัวรถไฟ (Car-body) เป็นโครงสร้างแข็ง ที่เชื่อมกับโบกี้ด้วยระบบสปริงและแดมเปอร์ โบกี้ (Bogie) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างกลางเชื่อมต่อระหว่างตะลึงกับรถ โดยมีระบบรองรับแรงสั่นสะเทือนด้วยสปริงและแดมเปอร์ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือระบบกันสะเทือนหลัก (Primary Suspension) ซึ่งติดตั้งอยู่ระหว่างเพลาลูกเบี้ยวกับโบกี้ และระบบกันสะเทือนรอง (Secondary Suspension) ซึ่งอยู่ระหว่างโบกี้กับตัวรถไฟ โดยในแบบจำลองนี้ระบบกันสะเทือนถูกแทนด้วย spring-damper ที่กำหนดค่าความ

แข็ง (stiffness) และค่าหน่วง (damping) ตามข้อมูลอ้างอิงของรถไฟความเร็วสูง ล้อและชุดล้อ (Wheelset) เป็นจุดสัมผัสหลักระหว่างรถไฟและราง ทำหน้าที่ถ่ายแรงทั้งหมดลงสู่ทางวิ่ง ราง (Rail) จำลองเป็นแบบไม่มีมวล (massless) โดยสามารถโก่งตัวตามแนวสะพานได้ แต่ไม่เกิดการสั่นสะเทือนเฉพะตัว

สะพาน (Bridge) จำลองด้วยแบบจำลอง Finite Element (FEM) แบบคานสองช่วง ช่วงละ 48 เมตร โดยมีเงื่อนไขที่ปลายแต่ละช่วงเป็น pin และ roller ตามลำดับ

ในแบบจำลองนี้ การถ่ายแรงจากล้อสู่รางและจากรางสู่สะพานพิจารณาผ่านระบบสปริงและแดมเปอร์ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบเพื่อให้สามารถวิเคราะห์แรงกระทำแบบไดนามิก โดยพิจารณาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของล้อในทั้ง 6 องศาอิสระ สำหรับพฤติกรรมของสะพาน จะพิจารณาการสั่นของโครงสร้างหลายโหมด (mode shape) โดยเฉพาะค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราหน่วง (damping ratio) เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลศาสตร์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านในแต่ละช่วงความเร็ว แบบจำลองสะพานที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นสะพานทางคู่ ซึ่งรองรับการเดินรถไฟได้สองเลน โดยในการจำลองจะพิจารณาการเดินรถในทิศทางเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพหน้าตัดสะพานรถไฟแบบลอคเกอร์เดอร์

3.2 Material properties

การทำแบบจำลองนอกจากการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองและขอบเขตของแบบจำลองแล้วจำเป็นต้องกำหนดทางกลของวัสดุและพารามิเตอร์ทางเทคนิคของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้รถไฟแบบ CR400BF (Fuxing Hao) เป็นต้นแบบสำหรับกำหนดพารามิเตอร์ เช่น มวลของตู้โดยสาร จุดศูนย์ถ่วง ความแข็งของระบบสปริงและแดมเปอร์ รวมถึงค่าความหน่วงของระบบช่วงล่าง ส่วนรางรถไฟใช้รางมาตรฐานแบบ UIC60 ซึ่งเป็นรางที่ใช้ในระบบรถไฟความเร็วสูงในหลายประเทศ โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุและชิ้นส่วนที่สำคัญจะถูกแสดงในรูปแบบตารางประกอบดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของรถไฟ CR400BF, Fuxing hao EMU train

PROPERTIES	Values	unit
Mass of car body	45,200	Kg
Mass of bogies	2,276	Kg
Mass of wheelset	1,627	Kg
Inertia of pitch motion of the car body	5.47×10^5	Kg.m ²
Inertia of pitch motion of the bogies	6,800	Kg.m ²
Inertia of pitch motion of the wheelset	133	Kg.m ²

Inertia of roll motion of the car body	51,000	Kg.m ²
Inertia of roll motion of the bogies	2,149	Kg.m ²
Inertia of roll motion of the wheelset	1,627	Kg.m ²
Inertia of yaw motion of the car body	576,528	Kg.m ²
Inertia of yaw motion of the bogies	8,548	Kg.m ²
Inertia of yaw motion of the wheelset	1,627	Kg.m ²
Primary Suspension Stiffness longitudinal	3.03×10^7	N/m
Primary Suspension Stiffness lateral	3.34×10^6	N/m
Primary Suspension Stiffness vertical	1.04×10^6	N/m
Primary Suspension Damping vertical	5×10^3	N.s/m
Secondary Suspension Stiffness longitudinal	1.6×10^5	N/m
Secondary Suspension Stiffness lateral	1.6×10^5	N/m
Secondary Suspension Stiffness vertical	4×10^5	N/m
Secondary Suspension Damping longitudinal	4×10^4	N.s/m
Secondary Suspension Damping lateral	1.45×10^4	N.s/m
Secondary Suspension Damping longitudinal	6×10^3	N.s/m

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของราง UIC60

PROPERTIES	Values	unit
Steel young's modulus	210	GPa
Shear yield stress	300×10^6	N/m ²
Poisson's ratio	0.27	
friction	0.25	
Stiffness lateral	1.8×10^7	N/m
Stiffness vertical	4.4×10^7	N/m
Damping lateral	1×10^5	N.s/m
Damping vertical	4×10^5	N.s/m

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสะพานรถไฟ

PROPERTIES	Values	unit
Bridge mass per unit length	29,905.64	Kg/m
2 span bridge length	96.00	m
Inertia of motion in x axis	4.02×10^7	Kg.m ²
Inertia of motion in y axis	2.209×10^9	Kg.m ²
Inertia of motion in z axis	2.241×10^9	Kg.m ²

3.3 การเสียแนวทางรถไฟ

การเสียแนวของรางรถไฟทั้งในแนวตั้ง (Vertical Misalignment) และแนวราบ (Lateral Misalignment) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถไฟบนสะพาน โดยเฉพาะในระบบรถไฟความเร็วสูงที่มีความไวต่อการเสียแนวมากกว่าระบบ รถ

ทั่วไป ความไม่ตรงแนวเหล่านี้ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นระหว่างล้อและราง ส่งผลกระทบต่อทั้งโครงสร้างสะพาน ความมั่นคงของล้อ และความสะดักสบายของผู้โดยสาร โดยการเสียแนวเกิดที่บริเวณกึ่งกลางของสะพานช่วงแรก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเสียแนวของราง โดยพิจารณาทั้งแนวตั้งและแนวราบในระดับแอมพลิจูดที่หลากหลาย พร้อมวิเคราะห์ค่า ความเสี่ยงต่อการป็นรางของล้อ (L/V Ratio) และดัชนีความสะดักสบาย (Ride Comfort Index) ที่เกิดขึ้นภายใต้กรณีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กรณีศึกษา

กรณีศึกษา	การเสียแนวรางรถไฟ	ความยาวคลื่น (m)	ความสูงคลื่น (mm)
Case 1	รางสมบูรณ์	-	0
Case 2	เสียแนวในแนวตั้ง	1.2	2, 4, 6, 8, 10
Case 3	เสียแนวในแนวนอน	8.0	4, 8, 12, 16, 20

3.4 การโค้งตัวของสะพาน

การวิเคราะห์การโค้งตัวของสะพานมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากรถไฟในความเร็วต่าง ๆ ความเร็วที่ความถี่ของแรงกระทำภายนอกมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง เมื่อถึงจุดนี้ ระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออาจถึงขั้นสั่นพ้อง (resonance) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายสะสมแก่โครงสร้างสะพานในระยะยาว การศึกษาค่าความเร็ววิกฤต (critical speed) จึงเป็นหัวใจสำคัญในการออกแบบระบบทางวิ่งและกำหนดความเร็วจำกัดของขบวนรถไฟ

3.5 ความเสี่ยงต่อการตกของรางรถไฟ

การตกของรางเป็นปัญหาด้านความปลอดภัยที่สำคัญ โดยเฉพาะเมื่อเกิดแรงด้านข้างที่สูงผิดปกติจากการเสียแนวของราง การประเมินความเสี่ยงในการตกของรางในงานวิจัยนี้อาศัยเกณฑ์ Nadal's Equation โดยในการศึกษานี้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) เท่ากับ 0.25 และมุมสัมผัส (β) จะเปลี่ยนไปตามรูปตัดของล้อและรางซึ่งใช้พิจารณาอัตราส่วนของแรงด้านข้างต่อแรงแนวตั้งดังแสดงในสมการที่ 1

$$\frac{L}{V} < \frac{\tan(\beta) - \mu}{1 + \mu \cdot \tan(\beta)} \quad (1)$$

โดยที่ L คือ แรงด้านข้างที่รางกระทำต่อล้อ (นิวตัน)

V คือ แรงแนวตั้งที่รางกระทำต่อล้อ (นิวตัน)

β คือ มุมของขอบล้อ (Flange angle) (องศา)

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง

3.6 ค่าดัชนีความสั่นสะเทือนในการโดยสาร

ค่าดัชนีความสั่นสะเทือนในการโดยสารเป็นตัวชี้วัดระดับแรงสั่นสะเทือนที่ผู้โดยสารรับรู้ขณะเดินทาง โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ISO 2631 ซึ่งใช้การประเมินค่าความเร่งในทิศทางต่างๆ ของตัวรถ แล้วนำมาถ่วงน้ำหนักด้วยค่าที่สะท้อนความรู้สึกจริงของมนุษย์ ในการศึกษานี้ ใช้การถ่วงน้ำหนักโดยให้ทิศทางแนวดิ่งมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1.4 เท่า เพื่อสะท้อนผลกระทบที่แรงกระทำในแนวดิ่งมีต่อความรู้สึกของผู้โดยสารมากกว่า จากนั้นจะนำค่าดัชนีรวมไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การประเมินความสบาย ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับความรู้สึกของผู้โดยสาร

RMS vibrational amplitude (m/s ²)	ระดับความรู้สึกของผู้โดยสาร
น้อยกว่า 0.315	ไม่รู้สึกอึดอัด
0.315 – 0.63	อึดอัดเล็กน้อย
0.5 – 1	อึดอัดพอสมควร
0.8 – 1.6	อึดอัด
1.25 – 2.5	อึดอัดมาก
มากกว่า 2	อึดอัดอย่างรุนแรง

การคำนวณ Weighted RMS Acceleration สำหรับการประเมิน Comfort Ride ต้องคำนวณ a_w จากค่าความเร่งในแนว x, y, และ z โดยใช้สมการที่ 2

$$a_w = \sqrt{(w_x a_x)^2 + (w_y a_y)^2 + (w_z a_z)^2} \quad (2)$$

โดยที่ w_x, w_y, w_z คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของความเร่งแต่ละแกน
 a_x, a_y, a_z คือ ค่าความเร่งในแต่ละแกน

4 ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 Model verification

ก่อนการวิเคราะห์ผลการศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลงานวิจัยในอดีต โดยใช้คุณสมบัติของรถไฟ TGV และความเร็ว 5 ค่า ได้แก่ 100, 150, 200, 250 และ 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการพิจารณาจากตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวและโก่งตัวสูงสุดของสะพานในแต่ละช่วงความเร็ว เพื่อยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองก่อนนำไปใช้วิเคราะห์กรณีศึกษา

ตารางที่ 6 ตรวจสอบความถูกต้องที่จุดสะพานเกิดการแอ่นตัวสูงสุด

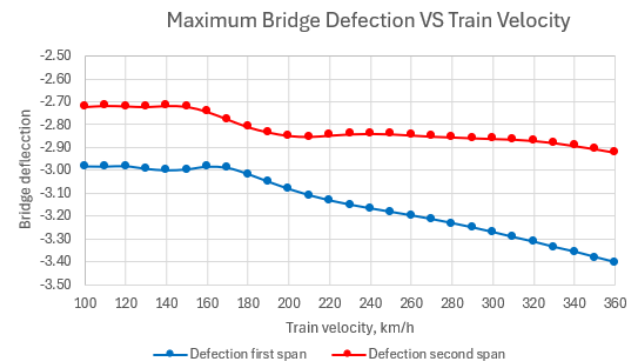
ความเร็วของรถไฟ (km/h)	UM VBI (mm)	Model Deflection (mm)	% Error
100	-22.75	-22.78	0.130
150	-22.77	-22.79	0.09
200	-22.91	-22.99	0.35

250	-23.04	-22.87	0.74
300	-22.92	-22.90	0.09

จากตารางที่ 6 พบว่าทุกกรณีที่ทำการตรวจสอบข้างต้นไม่มีกรณีไหนที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ ผลการวิจัยในอดีตเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถสรุปยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ต่อไปมีความน่าเชื่อถือ

4.2 Perfect track

4.2.1 Maximum bridge deflection

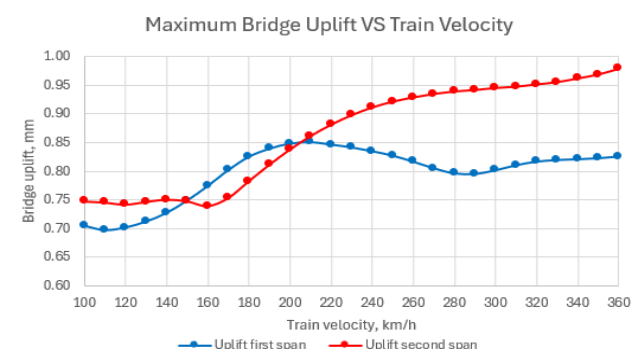


รูปที่ 2 ค่าการแอ่นตัวมากที่สุดของสะพานเมื่อรถไฟมีความเร็วต่างๆ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถไฟกับค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพาน พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 360 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าการแอ่นตัวของทั้งสะพานช่วงแรกและช่วงสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยเฉพาะหลัง 180 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สะพานช่วงแรกมีค่าการแอ่นตัวมากกว่าช่วงที่สอง เนื่องจากเป็นจุดรับแรงแนวดิ่งก่อนการถ่วงน้ำหนักไปยังตอม่อกลาง

ช่วงความเร็วต่ำ (100–160 กม./ชม.) กราฟแสดงค่าการโก่งตัวค่อนข้างราบเรียบ แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงเฉื่อยจากรถไฟเริ่มส่งผลให้เกิดการสั่นที่ชัดเจนมากขึ้น ลักษณะกราฟที่โค้งไม่เป็นเส้นตรงสะท้อนพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของระบบ และบ่งชี้ถึงการเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ส่วนสะพานช่วงที่สองมีการโก่งตัวน้อยกว่า เนื่องจากแรงบางส่วนถูกดูดซับไปในช่วงแรก และมีค่าการถ่วงน้ำหนักผ่านตอม่อกลาง

4.2.2 Maximum bridge uplift



รูปที่ 3 ค่าการโก่งตัวมากที่สุดของสะพานเมื่อรถไฟมีความเร็วต่างๆ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 3 ค่าการโก่งตัวของจุดกึ่งกลางสะพานช่วงแรกและช่วงที่สองเทียบกับความเร็วรถไฟ พบว่าค่าการโก่งตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 360 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยเฉพาะจุดกึ่งกลางสะพานช่วงที่สองมีการโก่งตัวขึ้นมากกว่าช่วงแรก เนื่องจากได้รับแรงเฉื่อยจากท้ายขบวนรถไฟซึ่งมากกว่าหัวขบวน ช่วงความเร็ว 160–240 กิโลเมตรต่อชั่วโมงพบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงชัดเจน โดยการโก่งตัวช่วงที่สองเพิ่มขึ้นเร็วกว่าช่วงแรก ขณะที่ช่วงแรกเริ่มมีแนวโน้มคงที่หลัง 220 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สะท้อนถึงการเข้าสู่สมดุลไดนามิกหรืออิทธิพลจากแดมปิ้ง ของโครงสร้าง

อย่างไรก็ตามจาก รูปที่4-1 และ รูปที่4-2 ไม่พบความเร็วใดในช่วงที่ศึกษาที่แสดงพฤติกรรมใกล้เคียงกับความเร็ววิกฤติหรือเกิดการสั่นพ้องอย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่า เป็นผลจากค่าความแข็งของสะพานที่สูง และการที่สะพานมีสองช่วงส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของแต่ละช่วงไม่เกิดการเสริมกัน แต่เกิดการรบกวนหรือหักล้างกัน ทำให้ไม่แสดงพฤติกรรมสั่นพ้องเด่นชัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4.3 Misalignment Track

ความไม่ตรงแนวของราง (Misalignment) เป็นความเบี่ยงเบนของแนวแกนรางจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยเฉพาะในรถไฟความเร็วสูง ความไม่ตรงแนวสามารถเพิ่มแรงไดนามิกระหว่างล้อกับราง และส่งผลต่อการสิ้นเปลืองหรือการโก่งตัวของโครงสร้างรองรับ

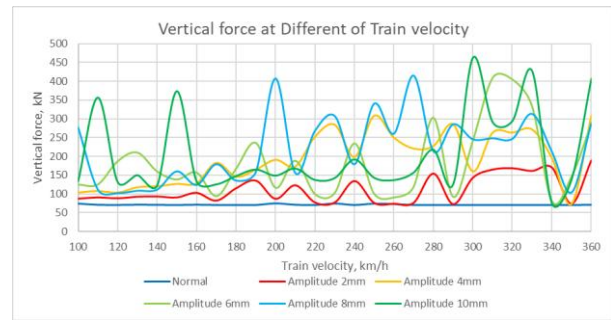
ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้จำลองผลกระทบของ การเสียแนวของรางในแนวตั้งและแนวราบโดยกำหนดให้เกิดขึ้นที่กึ่งกลางของสะพานช่วงแรก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดการโก่งตัวสูงสุดเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างและแรงกระทำระหว่างล้อและรางในสภาวะวิกฤต

4.3.1 Vertical Misalignment Track

ในการศึกษานี้ได้กำหนดกรณีศึกษาทั้งหมด 5 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของ การเสียแนวของรางในแนวตั้ง (Vertical Misalignment) ที่ตำแหน่งวิกฤตต่อพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานและแรงระหว่างรางกับล้อในระบบรถไฟความเร็วสูง โดยจำลองการเสียแนวของรางในรูปแบบคลื่นไซน์ที่มีความยาวคลื่นคงที่ 1.2 เมตร และค่าความสูง (Amplitude) ที่แตกต่างกันคือ 2, 4, 6, 8 และ 10 มม. การประเมินผลพิจารณาที่ล้อหมายเลข 6 ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่สะพานเกิดการแอ่นตัวสูงสุด

(a) Vertical Force

ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับล้อที่ 6 ในแนวตั้งที่ความเร็วต่างๆของรถไฟในแต่ละกรณี



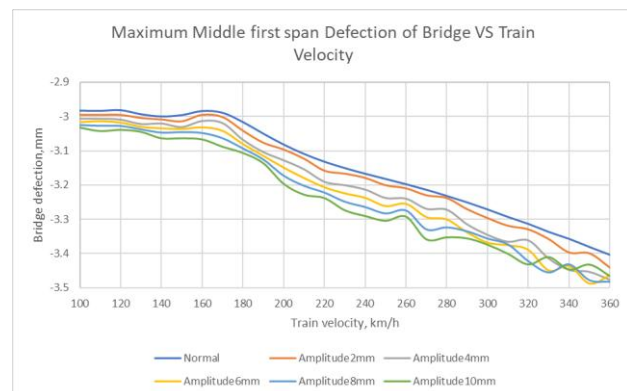
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับล้อในแนวตั้งเมื่อรถไฟมีความเร็วต่างๆ

จากการวิเคราะห์รูปที่ 4 แรงแนวตั้งที่กระทำกับล้อภายใต้เงื่อนไขที่เกิด การเสียแนวของรางในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรก พบว่าในกรณีปกติ (ไม่มี misalignment) แรงแนวตั้งคงที่ที่ประมาณ 70 กิโลนิวตันในทุกช่วงความเร็ว แสดงถึงความเสถียรของระบบ แต่เมื่อมีการเกิดความไม่ตรงแนว แม้เพียง 2–4 มม. แรงแนวตั้งเริ่มแปรปรวน โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงกว่า 200 กม./ชม.

ในกรณีที่แอมพลิจูด สูงขึ้น (6–10 มม.) ค่าแรงแนวตั้งเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น และเกิดพิคหลายช่วงความเร็ว แสดงถึง dynamic amplification ที่อาจสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยเฉพาะที่ 10 มม. พบค่าแรงสูงกว่า 400 กิโลนิวตัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับรางหรือล้อรถไฟได้ ชี้ให้เห็นว่า ความเร็วที่สูงร่วมกับความผิดปกติของราง ส่งผลต่อแรงไดนามิกอย่างรุนแรงและอาจกระทบต่อความปลอดภัยของระบบในภาพรวม

(b) Bridge Deflection

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์แต่ละกรณีของแอมพลิจูด เพื่อศึกษาว่าเมื่อความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อ การแอ่นตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรกอย่างไร



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรกกับความเร็วต่างๆ ในแต่ละความสูงของคลื่น

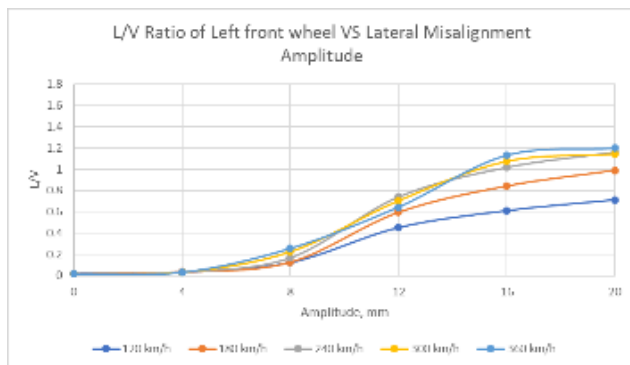
จากการวิเคราะห์รูปที่ 5 ผลกระทบของการเสียแนวของรางในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางสะพานช่วงแรก โดยพิจารณาค่า แอมพลิจูด 5 กรณี (2–10 มม.) พบว่าการแอ่นตัวของสะพานเพิ่มขึ้นตามขนาดของการเสียแนว โดยเฉพาะในช่วงความเร็ว 180–360 กม./ชม. ซึ่งแรงไดนามิกมีอิทธิพลสูง ช่วงความเร็วต่ำ (100–160 กม./ชม.)

ผลกระทบยังไม่เด่นชัด แต่ที่ความเร็วสูง เส้นกราฟของแต่ละกรณีเริ่มแยกจากกันชัดเจน แสดงถึงพฤติกรรมไดนามิกที่ไวต่อการเสียนแนว

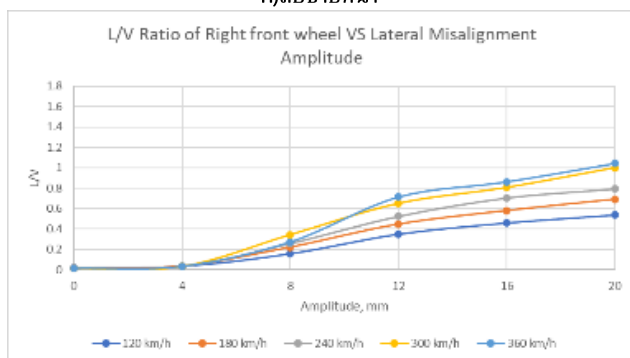
กราฟของ แอมพลิจูด 10 มม. แสดงค่าการโก่งตัวสูงสุดในทุกช่วงความเร็ว และพบรอยหยักบางจุดซึ่งอาจสัมพันธ์กับการตอบสนองใกล้เคียงธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีรางปกติ พบว่าการเสียนแนวแนวดิ่งเพียง 2 มม. ทำให้การแอ่นตัวเพิ่มขึ้น 0.58% ขณะที่การเสียนแนว 10 มม. ส่งผลให้สะพานแอ่นตัวเพิ่มขึ้นถึง 2.92% สะท้อนให้เห็นว่าความไม่ตรงแนวเพียงเล็กน้อยก็มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างในระบบรถไฟความเร็วสูง

4.3.2 Lateral Misalignment Track

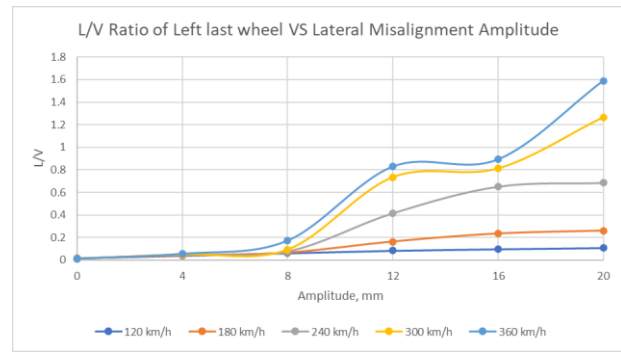
ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนของแรงในแนวราบต่อแรงในแนวดิ่ง (L/V Ratio) เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของล้อและประเมินความเสี่ยงของการปีนราง (wheel climb) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการตกราง การศึกษานี้พิจารณาการเสียนแนวของรางในแนวราบทั้งหมด 5 ระดับ ได้แก่ 4, 8, 12, 16 และ 20 มม. โดยใช้เวลาวิ่งเคลื่อนที่ 8 เมตร และกำหนดให้เกิดที่กึ่งกลางสะพานช่วงแรก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่โครงสร้างสะพานมีแนวโน้มเกิดการโก่งตัวสูงสุดภายใต้แรงกระทำจากรถไฟความเร็วสูง



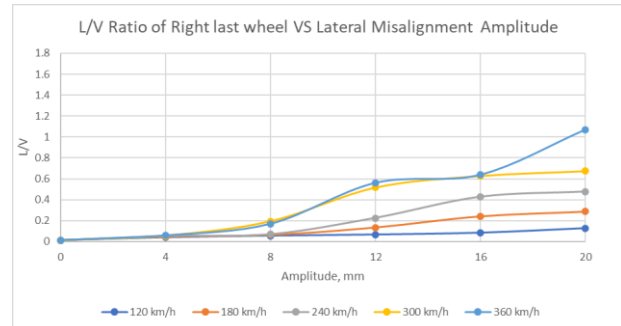
ก) ล้อซ้ายหน้า



ข) ล้อขวาหน้า



ค) ล้อซ้ายหลัง



ง) ล้อขวาหลัง

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงด้านข้างต่อแรงในแนวดิ่ง (L/V ratio) กับการเสียนแนวของรางในแนวราบ

จากการศึกษารูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียนแนวของรางในแนวราบกับค่า อัตราส่วนของแรงในแนวราบต่อแรงในแนวดิ่ง พบว่าค่าอัตราส่วน เพิ่มขึ้นตามขนาดแอมพลิจูดของความไม่ตรงแนว โดยเฉพาะเมื่อเกิน 8 มม. แรงด้านข้างที่เพิ่มขึ้นตามลักษณะความไม่ตรงแนวของรางส่งผลให้ล้อรถไฟต้องรับแรงราบสูงขึ้นอย่างมีนัย ทั้งนี้ล้อฝั่งซ้ายมีค่า อัตราส่วนสูงกว่าฝั่งขวา เนื่องจากลักษณะคลื่นเอียงไปทางซ้ายเท่านั้น

เมื่อวิเคราะห์ในกรณีแอมพลิจูดคงที่ที่ 20 มม. พบว่า อัตราส่วนเพิ่มขึ้นชัดเจนตามความเร็ว โดยล้อซ้ายซ้ายมีค่าสูงถึง 1.5906 ที่ 360 km/h ซึ่งเกินเกณฑ์วิกฤต 1.48 ตามทฤษฎีของ Nadal และสูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่มักกำหนดไว้ที่ 1.0 ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการตกรางสูงมาก และล้อซ้ายมีค่ามากกว่าล้อหน้อย่างชัดเจนในช่วงความเร็วสูง อันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยสะสมและผลกระทบจากการสั่นของโครงสร้างสะพาน

จากผลการวิเคราะห์พบว่า รถไฟสามารถวิ่งที่ความเร็วสูงสุด 360 km/h ได้อย่างปลอดภัยเมื่อการเสียนแนวของรางในแนวราบไม่เกิน 16 มม. หากเกินกว่านั้น ความเร็วสูงสุดที่ปลอดภัยจะลดลงเหลือประมาณ 180 km/h เพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อการปีนรางและการตกรางในระบบความเร็วสูง

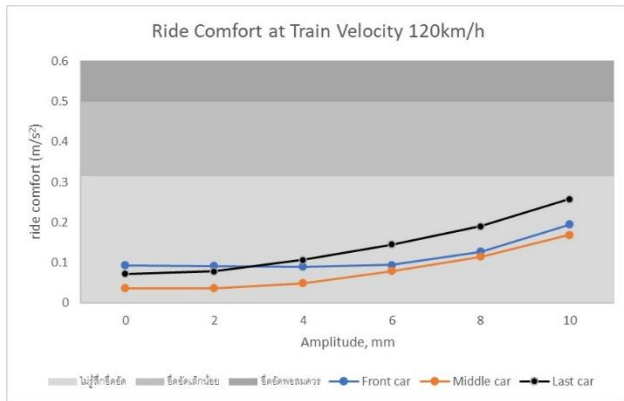
4.4 Ride Comfort

Ride Comfort หรือดัชนีความสะดักสบาย เป็นการประเมินผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่มีต่อผู้โดยสาร โดยอ้างอิงจากค่าความเร่งของตัวรถในทั้งสามทิศทาง (แกน x, y, z) และคำนวณร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักตามมาตรฐาน BS ISO 2631-

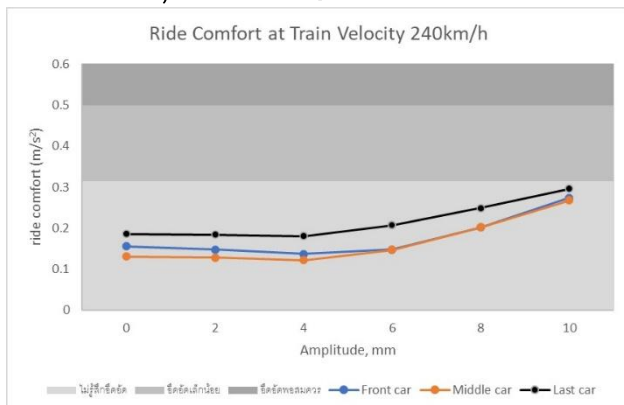
1:1997 ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของแกน z เท่ากับ 1.4 เพื่อสะท้อนผลกระทบต่อความรู้สึกของมนุษย์อย่างแม่นยำ โดยมีกรณีศึกษาผลกระทบจากความไม่ตรงแนวของรางทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ที่จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรก

4.4.1 Ride Comfort at Different Vertical Misalignment

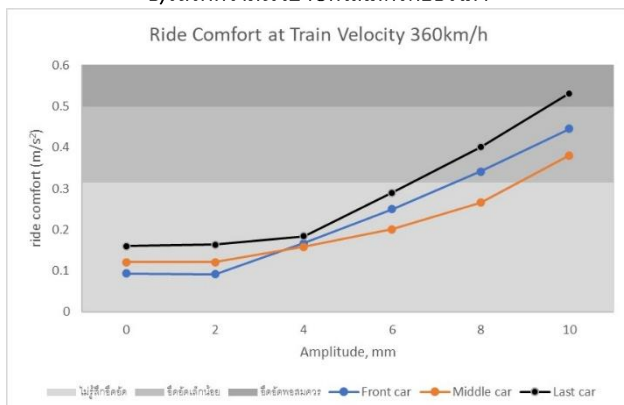
ในการศึกษาผลกระทบของการเสียแนวของรางในแนวตั้ง (Vertical Misalignment) ต่อ ความสั่นสะเทือนของผู้โดยสาร (Ride Comfort) ได้ทำการจำลองกรณีเบี่ยงเบนในแนวตั้งที่ค่าความสูง (Amplitude) เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 มม. เปรียบเทียบกับกรณีรางปกติ โดยใช้ความยาวคลื่น 1.2 เมตร ณ จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรก จากนั้นนำค่าความเร่งพิกของตัวรถในแต่ละคันรถไฟไปคำนวณเป็นค่าดัชนีความสั่นสะเทือน



ก)รถไฟความเร็ว120กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ข)รถไฟความเร็ว240กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ค)รถไฟความเร็ว360กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 7 ความสั่นสะเทือนในการโดยสารเมื่อรางเกิดการเสียแนวของรางในแนวตั้ง

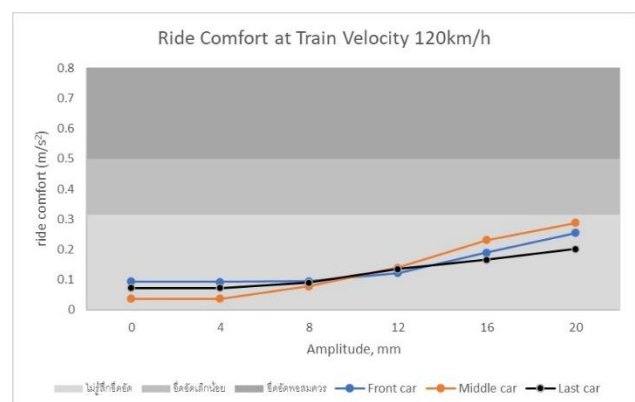
จากการวิเคราะห์รูปที่ 7 ค่าดัชนี (Ride Comfort) ภายใต้กรณีการเสียแนวของรางในแนวตั้งพบว่า ตู้ท้ายมีค่าดัชนีความไม่สะดวกสบายสูงสุดในเกือบทุกกรณี โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงและแอมพลิจูดเกิน 4 มม. สะท้อนผลสะสมของแรงสั่นสะเทือนจากตู้ก่อนหน้า ขณะที่ ตู้หน้ามีค่าดัชนีสูงในกรณีแอมพลิจูดต่ำ (0-2 มม.) ที่ความเร็ว 120 กม./ชม. เนื่องจากเผชิญแรงเปลี่ยนสภาพของรางและสะพานก่อนตู้อื่น ส่วน ตู้กลางมีค่าดัชนีต่ำสุดในทุกกรณี ซึ่งอาจเป็นผลจากการอยู่ในตำแหน่งสมดุลของขบวนรถ จึงได้รับแรงกระแทกและแรงสะสมต่ำกว่าตำแหน่งอื่น

นอกจากนี้ ยังพบแนวโน้มว่าในช่วงแอมพลิจูดต่ำ (0-4 มม.) ค่าดัชนีความสั่นสะเทือน (Ride Comfort) มีแนวโน้มลดลงก่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อแอมพลิจูดสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากประสิทธิภาพของระบบกันสะเทือนในการดูดซับแรงที่ยังทำงานได้ดีในช่วงแรก หรือเกิดจากการหักล้างกันของแรงในบางจังหวะ

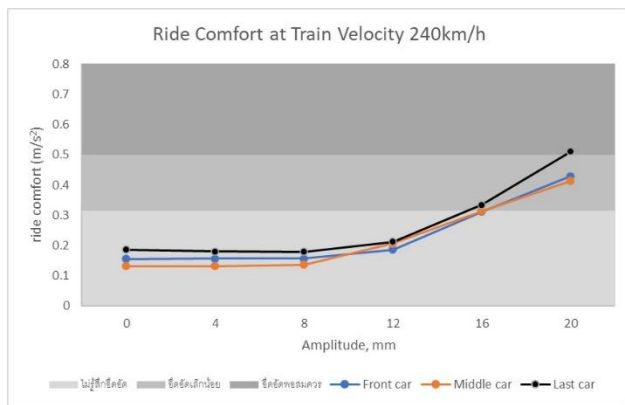
เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ISO 2631-1 พบว่าที่ความเร็ว 360 กม./ชม. และแอมพลิจูด 8-10 มม. ค่าดัชนีอยู่ในระดับ “อึดอัดเล็กน้อย” โดยเฉพาะในตู้หน้าและท้ายที่คันท้ายในกรณีแอมพลิจูด 10 มม. ค่าดัชนีอยู่ในระดับ “อึดอัดพอสมควร” ส่วนกรณีอื่นยังคงอยู่ในระดับ “ไม่รู้สึกอึดอัด” ผลลัพธ์สะท้อนว่า ตำแหน่งตู้โดยสารและขนาดการเสียแนวของรางส่งผลอย่างมีนัยต่อระดับความสบายของผู้โดยสารในระบบรถไฟความเร็วสูง

4.4.2 Ride Comfort at Different Lateral Misalignment

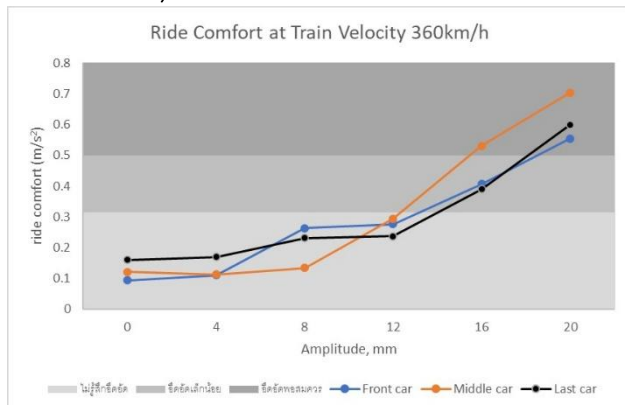
ในการศึกษาผลกระทบของการเสียแนวของรางในแนวราบ (Lateral Misalignment) ต่อ ค่าดัชนีความสั่นสะเทือน (Ride Comfort) ได้จำลองกรณีเบี่ยงเบนในแนวราบที่ค่าความสูง (Amplitude) เท่ากับ 4, 8, 12, 16, และ 20 มม. เปรียบเทียบกับกรณีรางปกติ โดยใช้ความยาวคลื่น 8 เมตร ณ จุดกึ่งกลางของสะพานช่วงแรก จากนั้นนำค่าความเร่งพิกของตัวรถในแต่ละคันไปคำนวณเป็นค่าดัชนี Ride Comfort และวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่าแอมพลิจูดที่เปลี่ยนไป



ก)รถไฟความเร็ว120กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ข)รถไฟความเร็ว240กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ค)รถไฟความเร็ว360กิโลเมตรต่อชั่วโมง

รูปที่ 8 ความสะดวกสบายในการโดยสารเมื่อรางเกิดการเสียนแนวของรางในแนวราบ

จากการศึกษา **รูปที่ 8** ผลกระทบของการเสียนแนวของรางในแนวราบต่อ ดัชนีความสะดวกสบาย (Ride Comfort Index) พบว่า เมื่อความเร็วของรถไฟและแอมพลิจูดของการเสียนแนวในแนวราบเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความสะดวกสบายของผู้โดยสารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อแอมพลิจูดเกิน 16 มม. ที่ความเร็ว 240–360 กม./ชม. ซึ่งสะท้อนถึงแรงสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัย

ที่ความเร็วต่ำ (120 กม./ชม.) ค่าดัชนีสูงสุดอยู่ที่คันหน้า แต่เมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น คันกลางเริ่มมีค่ามากที่สุด อาจเป็นผลจากการสั่นพ้องหรือแรงสั่นสะเทือนที่ถูกส่งต่อจากคันหน้า ที่ความเร็ว 240 กม./ชม. คันท้ายแสดงค่าดัชนีสูงสุดในหลายกรณี สันนิษฐานว่าเกิดจากการสะสมแรงสั่นจากขบวนด้านหน้า ส่วนที่ 360 กม./ชม. คันหน้าแสดงค่าดัชนีสูงสุดในช่วงแอมพลิจูดต่ำ ก่อนที่คันกลางจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแอมพลิจูดสูงขึ้น ขณะที่คันท้ายกลับมีค่าลดลง ซึ่งอาจสะท้อนพฤติกรรมการสลายพลังงานของคันท้ายที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ ISO ความเร็ว 240 กม./ชม. และ 360 กม./ชม. ที่แอมพลิจูด 16 มม. อยู่ในระดับ “อึดอัดเล็กน้อย” ที่แอมพลิจูด 20 มม. รถหลายคันเข้าสู่ระดับ “อึดอัดพอสมควร” ซึ่งควรพิจารณาแนวทางลดแรงสั่นสะเทือนในระบบรถไฟความเร็วสูง

5 สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์ของสะพานรถไฟภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่าทั้ง ความเร็วของรถไฟ และการเสียนแนวของราง

มีผลกระทบอย่างมีนัยต่อพฤติกรรมของระบบ โดยเฉพาะต่อ ค่าการแอ่นตัวของสะพาน, แรงแนวตั้งที่รางกระทำต่อล้อ, ค่าอัตราส่วน (L/V Ratio), และ ระดับความสะดวกสบายของผู้โดยสาร ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของระบบรถไฟความเร็วสูง

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการจำลองพบว่า ความเร็วของรถไฟและการเสียนแนวของรางในแนวตั้งและแนวราบ ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมพลศาสตร์ของสะพาน แรงที่รางกระทำกับล้อ ความเสี่ยงต่อการตกราง และค่าดัชนีความสะดวกสบายของผู้โดยสาร โดยการแอ่นตัวของสะพานเพิ่มขึ้นตามความเร็ว โดยเฉพาะในช่วง 180–360 กม./ชม. และเด่นชัดขึ้นเมื่อเกิด การเสียนแนวของรางในแนวตั้งขนาดใหญ่ แอมพลิจูด 10 มม. ซึ่งก่อให้เกิดแรงแนวตั้งสูงกว่า 400 กิโลนิวตัน

ในกรณีการเสียนแนวของรางในแนวราบ ค่าอัตราส่วนแรงด้านข้างต่อแรงในแนวตั้งที่รางกระทำต่อล้อรถไฟ เพิ่มขึ้นตาม แอมพลิจูดและความเร็ว โดยเฉพาะที่ล้อหลังซ้าย ซึ่งอาจเกินเกณฑ์เสี่ยงสูงต่อการปีนราง ($L/V > 1.48$) ที่ความเร็ว 360 กม./ชม. หากแอมพลิจูดเกิน 16 มม. ทำให้จำเป็นต้องจำกัดความเร็วเหลือเพียง ประมาณ 180 กม./ชม. เพื่อความปลอดภัย

ด้านความสะดวกสบาย ผู้โดยสารได้รับแรงสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนตามความเร็วและขนาดการเสียนแนว โดยเฉพาะที่ความเร็ว 360 กม./ชม. ในกรณีที่ การเสียนแนวของรางในแนวตั้งเท่ากับ 10 มม. และ การเสียนแนวของรางในแนวราบ เท่ากับ 20 มม. พบว่าค่าดัชนีเข้าสู่ระดับ “อึดอัดพอสมควร” ตามมาตรฐาน ISO 2631

สรุปได้ว่าทั้งความเร็วขบวนรถและระดับการเสียนแนวของรางเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมพฤติกรรมไดนามิกของระบบรถไฟ-สะพาน และควรนำมาใช้ในการกำหนด ข้อจำกัดความเร็ว และ มาตรฐานคุณภาพราง เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกสบายในระบบรถไฟความเร็วสูง

5.2 อภิปรายผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ความเร็วของรถไฟ ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการสั่นของสะพาน โดยสะพานช่วงแรกมีการแอ่นตัวลงมากที่สุดจากแรงกระแทกของหัวขบวน ขณะที่สะพานช่วงที่สองมีการโก่งตัวขึ้นชัดเจนเมื่อได้รับแรงเฉื่อยจากท้ายขบวนในช่วงความเร็วสูง แม้ไม่พบการเกิดสั่นพ้อง (resonance) อย่างชัดเจน แต่กราฟการแอ่นตัวเริ่มแสดงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นหลังความเร็ว 180 กม./ชม. ซึ่งอาจเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติได้หากเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้นไปอีก

กรณี การเสียนแนวของรางในแนวตั้ง แม้มีค่าเพียง 2–4 มม. ก็ส่งผลต่อแรงแนวตั้งที่รางกระทำกับล้อ โดยเฉพาะในช่วงความเร็วสูง ซึ่งบางช่วงความเร็วพบพฤติกรรม การขยายแรงแบบไดนามิกที่สะท้อนการใกล้เคียงกับสั่นพ้อง (resonance) ของระบบ โครงสร้างสะพานจึงต้องมีค่าความเรียบของรางในระดับควบคุมได้

ส่วนกรณีการเสียนแนวของรางในแนวราบ พบว่าเมื่อค่าเบี่ยงเบนเกิน 16 มม. และรถไฟมีความเร็วเกิน 300 กม./ชม. ค่า L/V ratio

ของล้อท้ายซ้ายอาจเกินเกณฑ์ความปลอดภัย (1.48) ตามหลักการของ Nadal's Criterion ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงต่อการป็นรางอย่างมีนัย

ในมิติของดัชนีความสะดวกสบาย (Ride Comfort) พบว่าเมื่อความเร็วและ แอมพลิจูด ของการเสียนแนวเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความสะดวกสบายก็เพิ่มขึ้นตาม ที่ความเร็วสูงทั้งในกรณีแนวตั้งและแนวราบ ส่วนกรณีแนวราบแม้แนวโน้มยังไม่ชัดเจนในทุกช่วงความเร็ว แต่ควรศึกษาเพิ่มเติมด้วยค่าความละเอียดของ แอมพลิจูดที่มากขึ้น

โดยสรุป ความไม่ตรงแนวของรางในทั้งสองทิศทาง และความเร็วรถไฟ ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานและความปลอดภัยของระบบรถไฟความเร็วสูงอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้กำหนดเกณฑ์ คุณภาพรางและข้อจำกัดความเร็ว เพื่อยกระดับความปลอดภัยและความสบายของผู้โดยสารในระบบรถไฟความเร็วสูงต่อไป

5.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสมจริงของแบบจำลองระบบรถไฟความเร็วสูงบนสะพาน ผู้วิจัยเสนอแนวทางพัฒนาดังนี้:

- (1) ปรับปรุงแบบจำลองรางจากวัตถุไม่มีมวล (massless rail) เป็นรางแบบยืดหยุ่น (flexural rail) เพื่อสะท้อนพฤติกรรมไดนามิกของรางได้ครบถ้วนยิ่งขึ้น
- (2) ปรับแบบจำลองรถไฟให้ตรงกับข้อมูลจำเพาะของ Fuxing Hao เพื่อความถูกต้องในการอ้างอิงเชิงวิศวกรรม
- (3) เพิ่มรายละเอียดองค์ประกอบทางวิ่ง เช่น แผ่นพื้น (slab track) และ แผ่นรองราง (rail pad) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความไม่ต่อเนื่องและคลื่นสะท้อนในระบบราง
- (4) วิเคราะห์ค่าความสะดวกสบายในการโดยสาร (ride comfort) ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตัวรถ เพื่อสนับสนุนการออกแบบที่เหมาะสมในเชิงสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม
- (5) ขยายรูปแบบและพารามิเตอร์ของความไม่ตรงแนวของรางให้หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีลุ่มหรือหลายความถี่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงของโครงสร้างทางวิ่งมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ชยุตม์ งามโชนง และ Dr. Naveen Kumar Kedia เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำ องค์ความรู้ ตลอดจนให้คำปรึกษาอย่างต่อเนื่อง และช่วยชี้แนะในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทํางานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณทีมสนับสนุนจาก โปรแกรม Universal Mechanism ที่ให้ความช่วยเหลือในการตอบคำถาม และให้คำแนะนำเชิงเทคนิคในระหว่างการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhai, W., Han, Z., Chen, Z., Ling, L., & Zhu, S. (2019). Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Vehicle System Dynamics*, 57(7), 984-1027.
- [2] Kargarnovin, M., Younesian, D., Thompson, D., & Jones, C. (2005). Ride comfort of high-speed trains travelling over railway bridges. *Vehicle System Dynamics*, 43(3), 173-197.
- [3] Kedia, N. K., Kumar, A., & Singh, Y. (2023). Assessment of dynamic behaviour and performance of existing Composite Railway bridges under the impact of a high-speed LHB Train using a coupled Approach. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(7), 3465-3480.
- [4] Noppharat, S., Raj, A., Ngamkhanong, C., Li, T., You, R., & Kaewunruen, S. (2024). Dynamic train-track interactions over track stiffness discontinuities in railway track transitions mitigated by resilient materials. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(8), 322.
- [5] Samavedam, G., Blader, F., & Thompson, D. (1996). Safety of High Speed Ground Transportation Systems: Track Lateral Shift: Fundamentals and State-of-the-art Review.
- [6] Xu, L., & Zhai, W. (2019). A three-dimensional model for train-track-bridge dynamic interactions with hypothesis of wheel-rail rigid contact. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, 471-489.
- [7] University, L. o. C. M. B. S. T. (2015). Railway vehicle and bridge interactions: some approaches and applicattions. <https://www.umlub.ru/en/pages/index.php?id=1>
- [8] Kuo, C.-M., & Lin, C.-C. (2016). Analysis of derailment criteria. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1158-1163.