

ระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพาน Bridge Weigh-In-Motion System using Deflection Response

สุพิชฌาย์ ทับพุ่ม¹, นคร คงภิรมย์ขึ้น², อมรชัย ไยจงศ์³ และ พัชรพงษ์ อาสนจินดา⁴

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา^{1,2,3}

หน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา⁴

E-mail: supitcha.tpp@gmail.com¹, nakorn.k9@gmail.com², jaiyong@eng.buu.ac.th³ และ

pattarapong@eng.buu.ac.th⁴



งานวิจัยนี้นำเสนอระบบชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้ผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพาน แทนการใช้ผลตอบสนองความเครียด โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดและวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน ซึ่งเพิ่มความถูกต้องด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติที่ใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรง โดยศึกษาด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยตัวอย่างเชิงตัวเลขและทำการประเมิน ประสิทธิภาพจากการศึกษาเชิงสถิติ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ผลการตอบสนองการโก่งตัวมีประสิทธิภาพดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยสัญญาณความเครียด โดยสามารถเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมได้ในช่วงที่กว้างมากขึ้นโดยให้ความถูกต้องของการหาน้ำหนักที่สูงกว่า โดยปัจจัยที่พบว่ามีผลต่อความถูกต้องมากที่สุดคือ ระดับความขรุขระของผิวทางและระดับสัญญาณรบกวนจากการตรวจวัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนแปรผันกับความขรุขระและระดับสัญญาณรบกวนจากการตรวจวัด ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนได้โดยการปรับสภาพ พื้นผิวสะพานให้มีความราบเรียบและใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีสัญญาณรบกวนต่ำหรือทำการกรองสัญญาณ การใช้ผลตอบสนองการโก่งตัวจึงเป็นอีกทางเลือกแทนการใช้มาตรวัดความเครียดที่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณจากการติดตั้งบริเวณที่เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กของผิวคอนกรีตได้



คำสำคัญ: ระบบชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน; การหาน้ำหนักเพลา; น้ำหนักรถบรรทุก; ผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพาน



Abstract

This research presents the bridge weigh-in-motion system to identify truck load from bridge deflection response instead of strain. The analysis employs a method of regularized least-squares with accuracy improvement by the updated static component technique applying the direct measurement influence line. The effectiveness is evaluated by numerical examples and statistical studies from computer simulation. The results reveal that analysis

using deflection response performs better effectiveness than strain. The appropriate regularization parameter can be selected in the broader range with higher identification accuracy. Bridge surface roughness and measurement noise are significant parameters of system accuracy. The identification error varies to roughness amplitude and noise level. The error can be reduced by smoothening the pavement and using low-noise instruments or applying noise filtering. Using the deflection response is therefore an alternative option to strain that could have a distorted signal if the strain gauge is installed on the microcrack of the concrete surface.



Keywords: bridge weigh-in-motion; axle load identification; truck weight; bridge deflection response



1. บทนำ

ระบบชั่งน้ำหนักถาวรทุกขณะเคลื่อนที่โดยใช้สะพาน (bridge weigh-in-motion, BWIM) เป็นระบบที่มีการวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบน้ำหนักถาวรทุกที่สัญจรบนเส้นทางโดยใช้สะพานที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด โดยระบบ BWIM ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจสอบน้ำหนักยานพาหนะหนักโดยใช้งบประมาณที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจากการใช้ด่านชั่งน้ำหนักถาวร (weigh station) หรือระบบชั่งน้ำหนักเคลื่อนที่แบบฝังใต้ผิวทาง (pavement WIM)

ระบบ BWIM วิเคราะห์น้ำหนักยานพาหนะได้โดยอาศัยการคำนวณย้อนกลับของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของโครงสร้างสะพาน โดยแรกเริ่มนั้น Moses [1] ใช้การคำนวณอย่างง่ายจากหลักการของเส้นอินฟลูเอนซ์ทางสถิตของคาน อย่างไรก็ตามพฤติกรรมที่แท้จริงของระบบยานพาหนะและสะพานนั้นมีลักษณะเป็นระบบทางพลศาสตร์ ทำให้มีการพัฒนาระบบโดยใช้หลักการของการหาแรงกระทำเคลื่อนที่ (moving force

identification, MFIS) ซึ่งวิเคราะห์ในโดเมนของเวลา [2] หรือโดเมนของความถี่ [3] ซึ่งพิจารณาน้ำหนักเพลาเป็นแรงกระทำแบบจุดซึ่งแปรผันตามเวลาและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และคำนวณจากผลตอบสนองโมเมนต์ดัดหรือความเครียดของคาน [4] ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยปัญหาของระบบพลศาสตร์แล้วจะพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จะเกิดความคลาดเคลื่อนสูงหากผลตอบสนองตรวจวัดมีสัญญาณรบกวน ซึ่งระบบการคำนวณจะเกิดสภาวะบกพร่อง (ill-condition) จากการอินเวอร์สเมตริกซิงกูลาร์ (inverse of a singular matrix) [5, 6] ซึ่งสามารถลดความแปรปรวนของแรงกระทำได้ด้วยวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน (Tikhonov regularization) ร่วมกับวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด [7-10] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จำเป็นต้องหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมโดยใช้เส้นโค้งรูปตัวแอล (L-curve) [11] ซึ่งจำเป็นต้องใช้การคำนวณซ้ำแบบลองผิดลองถูกจำนวนหลายรอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นเหตุให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานและยังคงพบความคลาดเคลื่อนสูงของแรงในบริเวณใกล้เคียงกับจุดรองรับของคานหรือสะพาน [12-14]

เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นการคำนวณซ้ำด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ (updated static component technique, USC) [15–17] ซึ่งสามารถเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันได้สะดวกมากยิ่งขึ้น และเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักเพลาทันทีบริเวณใกล้ตำแหน่งจุดรองรับของสะพานได้

ในกรณีพิจารณาเฉพาะการหาค่าน้ำหนักเพลาทงสถิติแล้ว พบว่าการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของเส้นอินฟลูเอนซ์จะมีความสะดวกรวดเร็วในการคำนวณมาก [18, 19] โดย O'Brien et al. [20] ได้ทำการคัดแยกเส้นอินฟลูเอนซ์ของโครงสร้างสะพานที่แท้จริงโดยคำนวณย้อนกลับจากผลตอบสนองตรวจวัดโดยตรงจากการทดสอบด้วยรถบรรทุกที่ทราบน้ำหนักเพลาส่งสามารถลดผลกระทบจากความขรุขระของสะพานรวมถึงสัญญาณรบกวนได้อย่างมีนัยสำคัญ [21–23] หรือการวิเคราะห์โดยใช้พื้นผิวอินฟลูเอนซ์สำหรับพิจารณารูปแบบการสัญจรของยานพาหนะบนแผ่นพื้นซึ่งมีหลายช่องจราจร [24, 25]

งานวิจัยโดย Asnachinda & Pinkaew [26] ได้พัฒนาการวิเคราะห์น้ำหนักเพลาด้วยการนำเส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพานที่คัดแยกได้จากการทดสอบโดยตรงมาคำนวณซ้ำด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ พบว่าได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากขึ้นทั้งน้ำหนักเพลาทงสถิติและทางพลศาสตร์ และมีงานวิจัยอีกมากที่พยายามแก้ปัญหาการวิเคราะห์น้ำหนักเพลาส่งจากสภาวะบกพร่องให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเทคนิคเรกูลาร์ไรเซชันแบบดั้งเดิม [27–31] แต่ยังคงพบว่าเมื่อเทียบกับการคำนวณซ้ำแล้วยังมีความถูกต้องที่ต่ำกว่า ขณะที่วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (neural network) [32] การใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม [33] หรือวิธีการค้นหาคำตอบ (searching) [34] นั้นจำเป็นต้องอาศัยการฝึกทดลองข้อมูล (data training) และ

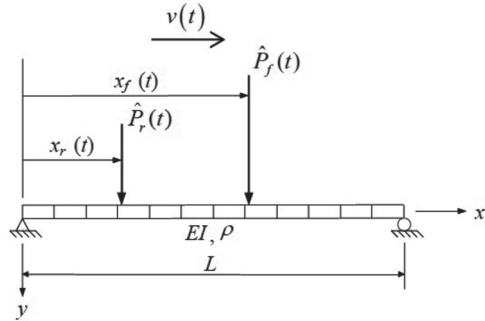
กำหนดค่าขอบเขตของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำให้การประมวลผลมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นหรือใช้เวลาคำนวณที่นานขึ้น

อย่างไรก็ตามผลตอบสนองของสะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์จากงานวิจัยข้างต้นนั้นล้วนพิจารณาจากผลตอบสนองความเครียด หรือ โมเมนต์ดัด ซึ่งหากสะพานเป็นโครงสร้างคอนกรีตแล้วการตรวจวัดด้วยผลตอบสนองเหล่านี้อาจได้ค่าเป็นผลตอบสนองเฉพาะจุด (local) เนื่องจากผิวคอนกรีตอาจเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก ทำให้หากติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) บริเวณที่มีการแตกร้าวแล้วผลตอบสนองตรวจวัดที่ได้ อาจทำให้ได้พฤติกรรมของสะพานที่คลาดเคลื่อนและส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์งานวิจัยนี้จึงพิจารณาการวิเคราะห์น้ำหนักเพลาส่งของรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่โดยพิจารณาผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพานสำหรับกรณีที่สามารถติดตั้งหัววัดการเปลี่ยนตำแหน่งด้านใต้ได้ เช่น สะพานที่ไม่มีการใช้งานบริเวณด้านใต้สะพานเป็นถนนหรือทางลอดหรือหากสามารถทำโครงถักเบายึดโยงด้านใต้ระหว่างช่วงสะพานเพื่อติดตั้งหัววัดการเปลี่ยนตำแหน่งได้ โดยพิจารณาการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยหลักการของ MFIS ด้วยการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์การโก่งตัวของสะพานจากการตรวจวัดโดยตรงร่วมกับเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ และทำการศึกษาเชิงตัวเลข โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการหาน้ำหนักด้วยการใช้ผลตอบสนองการโก่งตัว ว่ามีความพร้อมในการประยุกต์ใช้งานจริงมากน้อยเพียงใด

2. ทฤษฎี

ทฤษฎีของระบบยานพาหนะและสะพานจะพิจารณาน้ำหนักเพลาส่งเป็นแรงกระทำแบบจุดซึ่งแปรผันตามเวลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v บนสะพาน

ซึ่งจำลองด้วยชิ้นส่วนคานลักษณะแสดงดังภาพที่ 1 สำหรับยานพาหนะประเภท 2 เพลาด้วยแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ [14]



ภาพที่ 1 แบบจำลองคานและแรงกระทำเคลื่อนที่

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_b \mathbf{u} = \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{P}} \quad (1)$$

โดยที่ $\mathbf{M}_b$, $\mathbf{C}_b$ และ $\mathbf{K}_b$ คือเมทริกซ์ของมวล ความหน่วง และสติฟเนสของสะพานตามลำดับ และ $\hat{\mathbf{P}}$ คือเวกเตอร์ของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเพลากับสะพาน (interaction force) และแปลงเป็นกระทำที่ข้อ (nodal load) ได้ด้วยฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) $\mathbf{H}$ เมื่อแก้สมการการเคลื่อนที่จะได้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ข้อของสะพาน $\mathbf{U}$ ซึ่งสามารถแปลงค่าเป็นผลตอบสนองการโก่งตัว (deflection) ตามตำแหน่งบนคานได้โดยหากให้ $\hat{\mathbf{Z}}$ เป็นเวกเตอร์ของการโก่งตัวทางทฤษฎีที่จุดตรวจวัดต่าง ๆ จำนวน m จุดซึ่งขึ้นกับเวลา t ดังสมการที่ (2) ขณะที่ในการหาค่าน้ำหนักเพลานั้น ผลตอบสนองการโก่งตัวที่แท้จริง $\mathbf{Z}$ ได้จากการตรวจวัดโก่งตัวของสะพานซึ่งจัดรูปเป็นเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ (3)

$$\hat{\mathbf{Z}} = \{\hat{z}_1(t) \quad \hat{z}_2(t) \quad \cdots \quad \hat{z}_m(t)\}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{Z} = \{z_1(t) \quad z_2(t) \quad \cdots \quad z_m(t)\}^T \quad (3)$$

การหาค่าน้ำหนักเพลายานพานะนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของผลต่างระหว่าง

ผลตอบสนองตรวจวัดกับผลตอบสนองทฤษฎี ร่วมกับการใช้เทคนิคเรกูลาร์ไรเซชัน (Tikhonov's regularization) เพื่อลดความแปรปรวนของผลลัพธ์ ดังสมการที่ (4)

$$J(\hat{\mathbf{P}}, \lambda) = \|\mathbf{Z} - \hat{\mathbf{Z}}\|^2 + \lambda \|\hat{\mathbf{P}}\|^2 \quad (4)$$

โดยที่ λ คือค่าเรกูลาร์ไรเซชัน และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยให้ $\frac{\partial J}{\partial \hat{\mathbf{P}}} = 0$ จะได้ค่าของน้ำหนักเพลายานพาหนะ โดยใช้วิธี State-space ร่วมกับการย่อยเมทริกซ์ด้วยวิธี Singular Value Decomposition หรือ SVD ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้า [17, 26]

เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการวิเคราะห์น้ำหนักเพลการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพานที่ได้จากการทดสอบโดยตรง [20] จะถูกนำมาใช้แทนที่เส้นอินฟลูเอนซ์ทางสถิติที่ใช้ในการคำนวณด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติ [26] โดยมีกระบวนการดังภาพที่ 2 แต่ปรับผลตอบสนองให้เป็นผลตอบสนองการโก่งตัวเพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นอินฟลูเอนซ์ที่แท้จริงของโครงสร้างสะพานซึ่งจะพิจารณาผลของความขรุขระและระดับสัญญาณรบกวนของการตรวจวัดโดยนำรถบรรทุกที่ทราบค่าน้ำหนักเพลาทงสถิติมาทดสอบและบันทึกผลตอบสนองการโก่งตัว โดยมีความสัมพันธ์ของผลตอบสนองการโก่งตัวของจุดตรวจวัด j (Z_j) กับน้ำหนักเพลาทงสถิติของรถบรรทุกทดสอบจำนวน n เพล่า ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยเส้นอินฟลูเอนซ์ของจุดตรวจวัด j ดังสมการที่ (5)

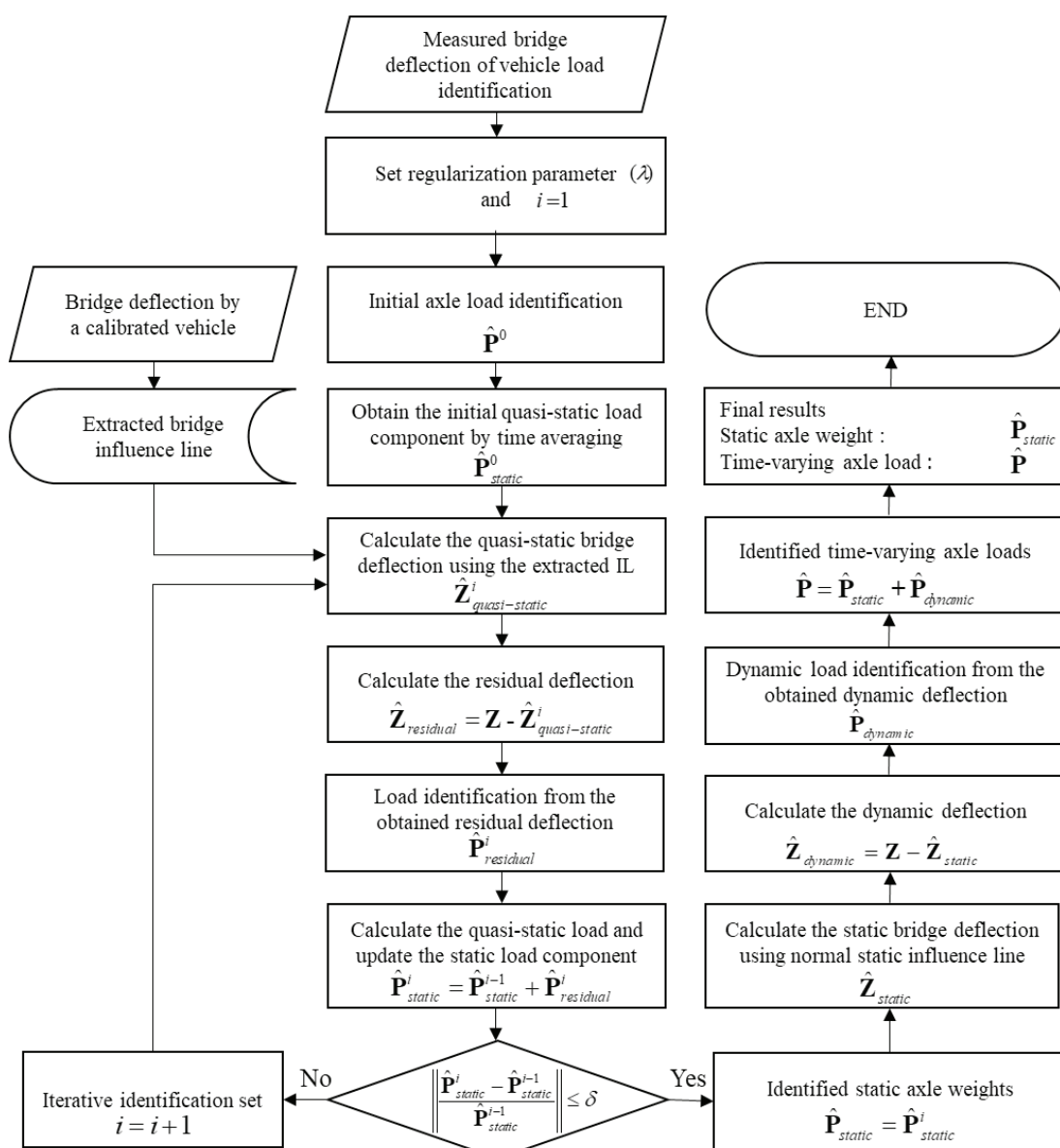
$$\mathbf{Z}_j = \sum_{i=1}^n \mathbf{I} \mathbf{L}_j^i \cdot P_i^{static} \quad (5)$$

โดยที่ $\mathbf{IL}_j$ คือเวกเตอร์เส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพาน ณ จุดตรวจวัด j ที่มีตำแหน่งบนสะพานสอดคล้องกับ น้ำหนักเพลาทาสถิตที่ i ($\hat{P}_i^{static}$) จากสมการที่ (5) จะสามารถจัดรูปให้อยู่ในความสัมพันธ์ของผลตอบสนองการโก่งตัวและเส้นอินฟลูเอนซ์ได้ดังสมการที่ (6) โดยที่ $\mathbf{W}_j$ คือเมทริกซ์แปลงค่าระหว่างเส้นอินฟลูเอนซ์ของจุดตรวจวัด j กับผลตอบสนองการโก่งตัวจุดตรวจวัด j ที่ได้จากการทดสอบ โดยเมทริกซ์

$\mathbf{W}$ มีองค์ประกอบที่ขึ้นกับค่าน้ำหนักเพลาทาสถิต และตำแหน่งเพลารถบรรทุกบนสะพาน ซึ่งเมื่อแก้ระบบสมการเชิงเส้นจะได้เส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพาน ดังสมการที่ (7) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำต่อไป

$$\mathbf{Z}_j = \mathbf{W}_j \mathbf{IL}_j \quad (6)$$

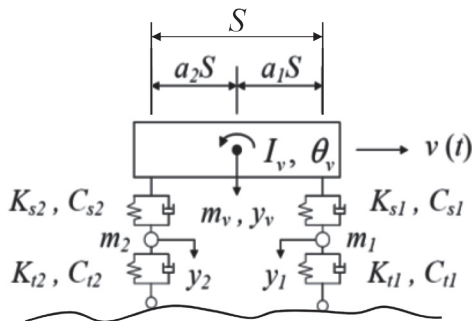
$$\mathbf{IL}_j = (\mathbf{W}_j^T \mathbf{W}_j)^{-1} \mathbf{W}_j^T \mathbf{Z}_j \quad (7)$$



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำหนักเพลารถบรรทุก

3. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้พิจารณาการหาคำนวณเพลาถนนรถบรรทุก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะแบบสองเพลากับ 4 ตีกรีความอิสระดังภาพที่ 3 โดย m_v , I_v , m_1 และ m_2 คือมวลของตัวรถ, โมเมนต์ความเฉื่อยจากการหมุนของมวลรถ, มวลช่วงล่างและยางของเพลาคานหน้า, และมวลช่วงล่างและยางของเพลาลังตามลำดับ C_s และ C_t คือความหน่วงของช่วงล่างและยางตามลำดับ K_s และ K_t คือสตีฟเฟิสของช่วงล่างและยางตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในแต่ละเพลาคาน ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองเดียวกันกับที่ใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองในคอมพิวเตอร์ในหลายงานวิจัยก่อนหน้า [14, 17, 26]



ภาพที่ 3 แบบจำลองรถบรรทุกสองเพลาคาน

โดยคุณสมบัติของรถบรรทุกและสะพานแสดงดังตารางที่ 1 ขณะที่พื้นผิวสะพานได้พิจารณาผลของความขรุขระโดยได้จำลองความขรุขระตามข้อกำหนด ISO-8606 [35] ด้วยโปรไฟล์ความขรุขระ Class B

ผลตอบสนองการโก่งตัวที่ได้จากปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะและสะพานจะพิจารณาที่จุดตรวจวัดจำนวน 3 หน้ตัดได้แก่ที่ตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ โดยเพิ่มสัญญาณรบกวนด้วย white noise ในสัดส่วน 1%, 5% และ 10% ของขนาดแอมพลิจูด

สูงสุดของผลตอบสนอง โดยมีความถี่ในการบันทึกข้อมูล (sampling frequency) เท่ากับ 200 Hz

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสะพานและรถบรรทุก

Bridge parameters	
$L = 30$ m	$\rho A = 5,000$ kg/m
$EI = 2.5 \times 10^{10}$ N·m ²	$\xi = 0.02$ (all modes)
Truck parameters	
$m_v = 12.5 - 32.5$ ton	$I_v = 1.47 \times 10^5$ kg·m ²
$m_1 = 1,500$ kg	$m_2 = 1,000$ kg
$C_{s1} = 3.00 \times 10^4$ N·s/m	$C_{s2} = 4.00 \times 10^4$ N·s/m
$C_{t1} = 3.90 \times 10^3$ N·s/m	$C_{t2} = 4.30 \times 10^3$ N·s/m
$k_{s1} = 2.47 \times 10^6$ N/m	$k_{s2} = 4.23 \times 10^6$ N/m
$k_{t1} = 3.74 \times 10^6$ N/m	$k_{t2} = 4.60 \times 10^6$ N/m
$a_1 = 0.519$	$a_2 = 0.481$
$S = 4.27$ m	

เส้นอินฟลูเอนซ์ของสะพานได้จากการใช้รถบรรทุกปรับเทียบซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 1 แต่ปรับให้มีน้ำหนักรวมของรถบรรทุกเท่ากับ 20 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ได้สัญญาณตรวจวัดที่มีแอมพลิจูดชัดเจนจากมวลที่ไม่เบาเกินไปและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่สูงเกินไปจนส่งผลให้ค่าน้ำหนักเพลาทงสถิตแปรปรวนและไม่เคลื่อนที่เข้าเกินไปซึ่งเพียงพอที่จะได้คุณลักษณะของความขรุขระของสะพานและสัญญาณรบกวนรวมอยู่ในเส้นอินฟลูเอนซ์ที่คำนวณได้ และการวิเคราะห์น้ำหนักเพลามีความถูกต้องมากขึ้น ตามข้อเสนอแนะของงานวิจัยของ Asnachinda & Pinkaew [26]

การประเมินความถูกต้องของการหาคำนวณรถบรรทุกจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของ

น้ำหนักทางสถิต (static weight error) และค่าความคลาดเคลื่อนของเวกเตอร์แรงทางพลศาสตร์ด้วยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative percentage error, RPE) ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$\text{Static weight error} = \left(\frac{\hat{N} - N}{N} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (8)$$

โดยที่ N และ $\hat{N}$ คือค่าน้ำหนักทางสถิตที่แท้จริงและที่วิเคราะห์ได้ตามลำดับ

$$\text{RPE} = \frac{\|\hat{\mathbf{P}} - \mathbf{P}\|}{\|\mathbf{P}\|} \times 100 \text{ (\%)} \quad (9)$$

โดยที่ $\mathbf{P}$ และ $\hat{\mathbf{P}}$ คือเวกเตอร์ของน้ำหนักทางพลศาสตร์ที่แท้จริงและที่วิเคราะห์ได้ตามลำดับ

ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

- 1) การศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์กรอบของค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และ
- 2) การศึกษาประสิทธิภาพของระบบการหาน้ำหนักยานพาหนะจากการศึกษาในเชิงสถิติ

โดยในการศึกษารูปแบบแรกนั้นจะพิจารณาหาช่วงที่เหมาะสมสำหรับเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชัน ด้วยการปรับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะและสะพาน จำนวนกรณีศึกษา 3 กรณีด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 โดยปรับมวลรถบรรทุก ความเร็วในการสัญจร ระดับความขรุขระของผิวทาง และระดับสัญญาณรบกวนที่ส่งผลให้สัญญาณตรวจวัดมีคุณลักษณะที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ผลแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ สัญญาณคุณภาพดี (A), สัญญาณคุณภาพปานกลาง (B), และสัญญาณคุณภาพแย่ (C) โดยพิจารณาเลือกค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่จะใช้งานค่าเดียว

สำหรับทุกกรณีเพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยสัญญาณคุณภาพดีหมายถึงสัญญาณที่มีแอมพลิจูดมากจากมวลยานพาหนะที่หนัก มีผลทางพลศาสตร์น้อยจากความเร็วรถที่ต่ำและความขรุขระของผิวทางน้อย มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ ขณะที่สัญญาณคุณภาพแย่มจะมีลักษณะตรงกันข้าม ทั้งนี้ระดับความขรุขระของสะพานที่กำหนดในตารางที่ 2 ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 1, 2 และ 3 มิลลิเมตรนี้ ถูกกำหนดขึ้นมาจากการพิจารณาแรงกระแทก (impact load) ของน้ำหนักรวมของรถบรรทุกให้มีระดับที่แตกต่างกัน โดยแอมพลิจูดความขรุขระของสะพานทั้งสามระดับดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดแรงกระแทกในสัดส่วนประมาณ 1.1, 1.2 และ 1.3 หรือเทียบเท่ากับอัตราส่วน 10%, 20% และ 30% ของน้ำหนักรวมทางสถิตของยานพาหนะ (gross vehicle weight, GVW) ตามลำดับ เมื่อใช้รถบรรทุกหนัก 25 ตันเคลื่อนที่ข้ามสะพานด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยแรงกระแทกคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$\text{Impact Load} = \frac{\max(\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)}{GVW} \quad (10)$$

โดยที่ $\mathbf{P}_1$ และ $\mathbf{P}_2$ คือเวกเตอร์น้ำหนักเพลาทางพลศาสตร์ของเพลาทันหน้าและเพลาลังตามลำดับ

ตารางที่ 2 กรณีทดสอบสำหรับหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสม

Parameter \ Case	A	B	C
Truck gross weight (ton)	35	25	15
Moving speed (km/hr)	30	60	90
Roughness amplitude (mm)	1	2	3
Measurement noise (%)	1	5	10

สำหรับการศึกษาในรูปแบบที่ 2 จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่ได้จากการศึกษารูปแบบแรก โดยพิจารณากรณีที่ทดสอบจากการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของรถบรรทุก ได้แก่ มวล ความเร็ว ระยะช่วงเพล และอัตราส่วนของน้ำหนักเพลหน้าต่อน้ำหนักรวม (front axle weight to gross weight ratio, FGR) ดังตารางที่ 3 และพิจารณาควบคู่กับสภาพของผิวทางและสัญญาณรบกวน 3 กลุ่ม ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณในระดับดี (Good) ปานกลาง (Moderate) และแย่ (Bad) ได้แก่

- 1) พื้นผิวสะพานมีความขรุขระน้อยและระดับสัญญาณรบกวนต่ำ (Good)
- 2) พื้นผิวสะพานมีความขรุขระปานกลางและระดับสัญญาณรบกวนปานกลาง (Moderate) และ
- 3) พื้นผิวสะพานมีความขรุขระมากและระดับสัญญาณรบกวนสูง (Bad)

โดยทั้ง 3 กลุ่มนี้กำหนดค่าแอมพลิจูดของความขรุขระและระดับสัญญาณรบกวนตามกรณี A B และ C ดังตารางที่ 2 โดยแต่ละกลุ่มจะทำการสุ่มพารามิเตอร์ให้มีจำนวนกรณีทดสอบกลุ่มละ 1,000 กรณี ดังนั้นในการศึกษาเชิงสถิตินี้จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ 3 กลุ่ม รวมทั้งหมด 3,000 กรณี

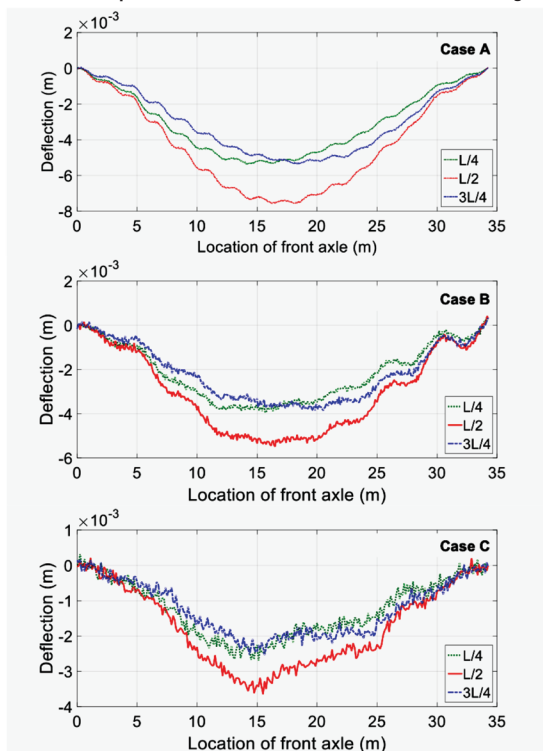
ตารางที่ 3 ช่วงพารามิเตอร์สำหรับสุ่มค่าในการศึกษาเชิงสถิติ

Parameter	Random range
Truck gross weight (ton)	10 – 40
Moving speed (km/hr)	10 – 120
Axle spacing (m)	2.5 – 7.0
FGR	0.2 – 0.8

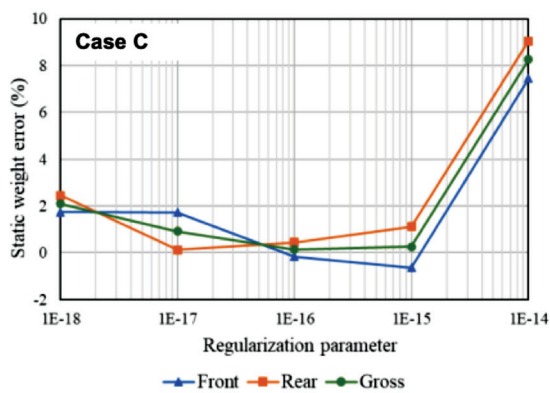
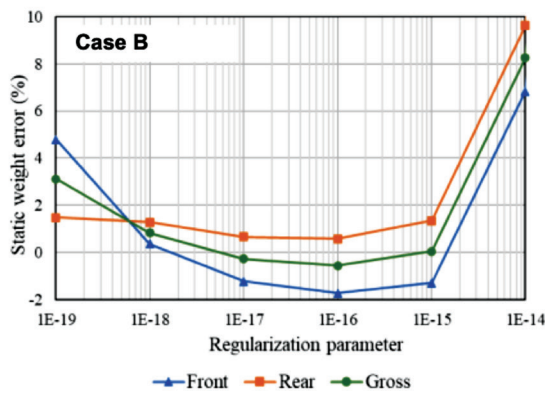
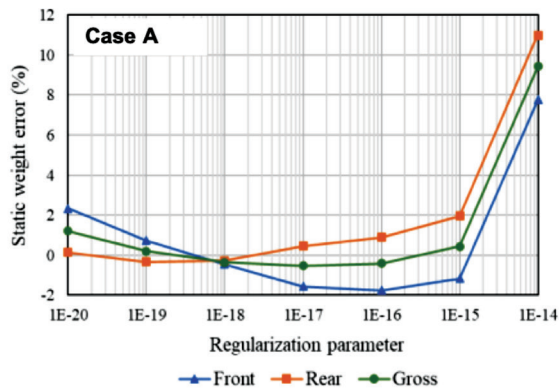
4. ผลการศึกษา

4.1 การศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์กรอบของค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

หัวข้อนี้จะอภิปรายผลการศึกษาในรูปแบบที่ 1 เพื่อใช้ในการหาค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมโดยภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพานในการศึกษารูปแบบที่ 1 โดยจาก 3 กรณีทดสอบ A B และ C ตามตารางที่ 2 ซึ่งมีคุณภาพของสัญญาณตรวจวัดที่แตกต่างจากคุณภาพดี ปานกลาง และแย่ ตามลำดับ โดยหากรถบรรทุกมีมวลมาก เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำบนสะพานที่ขรุขระน้อยและมีสัญญาณรบกวนจากการตรวจวัดในระดับต่ำ จะมีลักษณะการโก่งตัวที่มีผลทางพลศาสตร์และความแปรปรวนที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับกรณีที่รถบรรทุกเบา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงบนสะพานที่ขรุขระมากและมีระดับสัญญาณรบกวนสูง

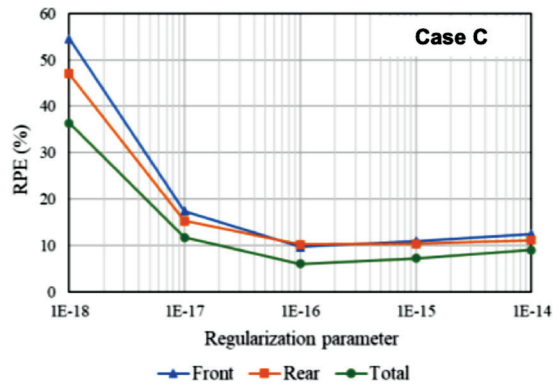
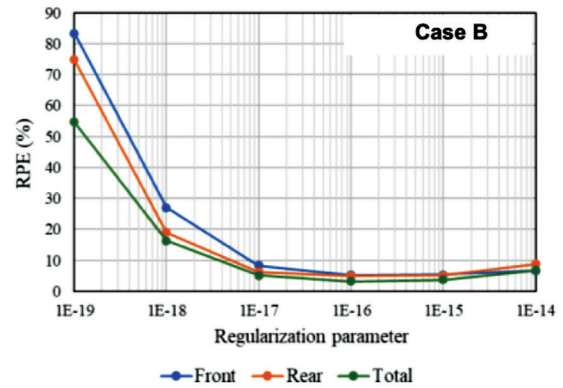
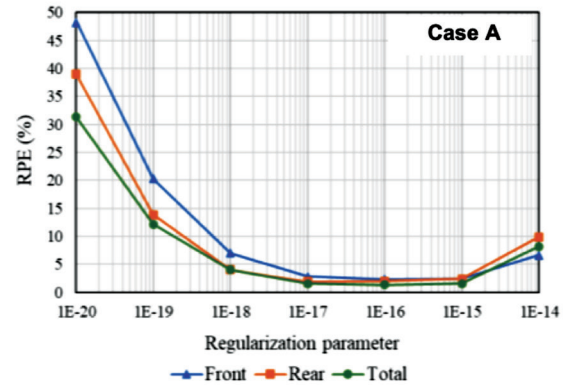


ภาพที่ 4 ลักษณะผลตอบสนองการโก่งตัวของสะพานจากการศึกษารูปแบบที่ 1 ที่มีคุณภาพสัญญาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 5 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักทางสถิตจากการศึกษารูปแบบที่ 1 ในแต่ละกรณีทดสอบ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่แตกต่างกัน

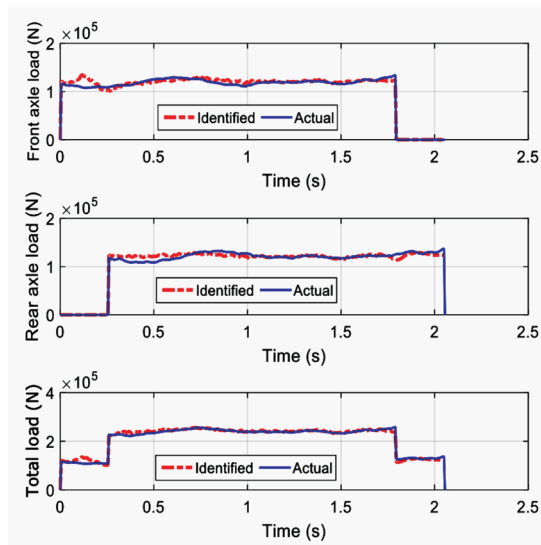
ภาพที่ 5 และภาพที่ 6 เป็นผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณีเมื่อใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินความถูกต้องและพิจารณาเลือกค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้วิเคราะห์น้ำหนักยานพาหนะในทุกกรณีได้



ภาพที่ 6 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแรงทางพลศาสตร์จากการศึกษารูปแบบที่ 1 ในแต่ละกรณีทดสอบ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่แตกต่างกัน

จากผลลัพธ์ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 พบว่าการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 1×10^{-16} ให้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าเลือกใช้ค่าอื่นหากพิจารณาทั้ง 3 กรณีทดสอบ ซึ่งหากสัญญาณมีคุณภาพดีค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมจะมีช่วงที่กว้างกว่ากรณีที่คุณภาพสัญญาณแย่ โดยกรณีทดสอบ A ซึ่งมีคุณภาพสัญญาณดี หากพิจารณาในช่วงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกทางสถิติของรถบรรทุกที่ไม่เกิน 2% จะมีการรอบของค่าเรกูลาร์ไรเซชันระหว่าง 10^{-20} ถึง 10^{-15} ขณะที่กรณี B และ C ซึ่งมีคุณภาพสัญญาณที่แย่ง ที่ระดับความคลาดเคลื่อนเดียวกันจะมีการรอบของค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่แคบลง โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-18} ถึง 10^{-15}

เมื่อเปรียบเทียบค่าเรกูลาร์ไรเซชันกับการวิเคราะห์โดยใช้ผลตอบสนองความเครียด พบว่ามีค่าที่แตกต่างกันมาก โดยผลการวิเคราะห์ด้วยผลตอบสนองความเครียด โดย Asnachinda & Pinkaew [26] จะมีค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในสเกลแบบลอการิทึมแล้ว พบว่าการใช้สัญญาณการโก่งตัวมีช่วงสำหรับเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมในกรอบที่กว้างกว่าการวิเคราะห์ด้วยผลตอบสนองความเครียด



ภาพที่ 7 ลักษณะน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ได้ กรณี B (คุณภาพสัญญาณปานกลาง) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 10^{-16}

ภาพที่ 7 แสดงลักษณะของแรงทางพลศาสตร์ของน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมของรถบรรทุกที่วิเคราะห์ได้ เมื่อใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 10^{-16} สำหรับกรณี B ซึ่งมีคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระดับปานกลาง โดยพบว่าลักษณะแรงกระทำของน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมที่วิเคราะห์ได้นั้นมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับแรงที่แท้จริง

ทั้งนี้ข้อสังเกตว่าการเลือกค่าเรกูลาร์ไรเซชันในแต่ละสภาพความขรุขระและสัญญาณรบกวนนั้นสามารถใช้ค่าที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีได้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของสะพานและเครื่องมือตรวจวัด อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการใช้งานและการเปรียบเทียบ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าเดียวกันสำหรับทุกกรณี ด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 10^{-16} โดยตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ทั้งสามกรณีด้วยค่าเรกูลาร์ไรเซชันเดียวกัน โดยพบว่าทุกกรณีใช้จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำเท่ากันที่จำนวน 6 รอบ โดยทั้งสามกรณีมีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมทางสถิติไม่เกิน 3% และ 2% ตามลำดับ ขณะที่ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของน้ำหนักเพลาน้ำหนักรวมทางพลศาสตร์มีค่าไม่เกิน 13% และ 7% ตามลำดับ โดยระบบจะมีความคลาดเคลื่อนต่ำหากคุณภาพสัญญาณอยู่ในระดับที่ดี และจะมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นหากคุณภาพสัญญาณลดลง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกโดยใช้
ค่าเรกูลาร์ไรเซชันเท่ากับ 10^{-16} ในทุกกรณี

Case	A	B	C
<i>Static weight error</i>			
Front axle weight (%)	-2.01	-2.12	2.60
Rear axle weight (%)	0.96	0.75	0.43
Gross weight (%)	-0.49	-0.66	1.52
<i>RPE of dynamic load</i>			
Front axle load (%)	2.41	5.51	10.98
Rear axle load (%)	1.89	5.03	12.23
Total load (%)	1.28	3.33	6.68
Number of iterations	6	6	6

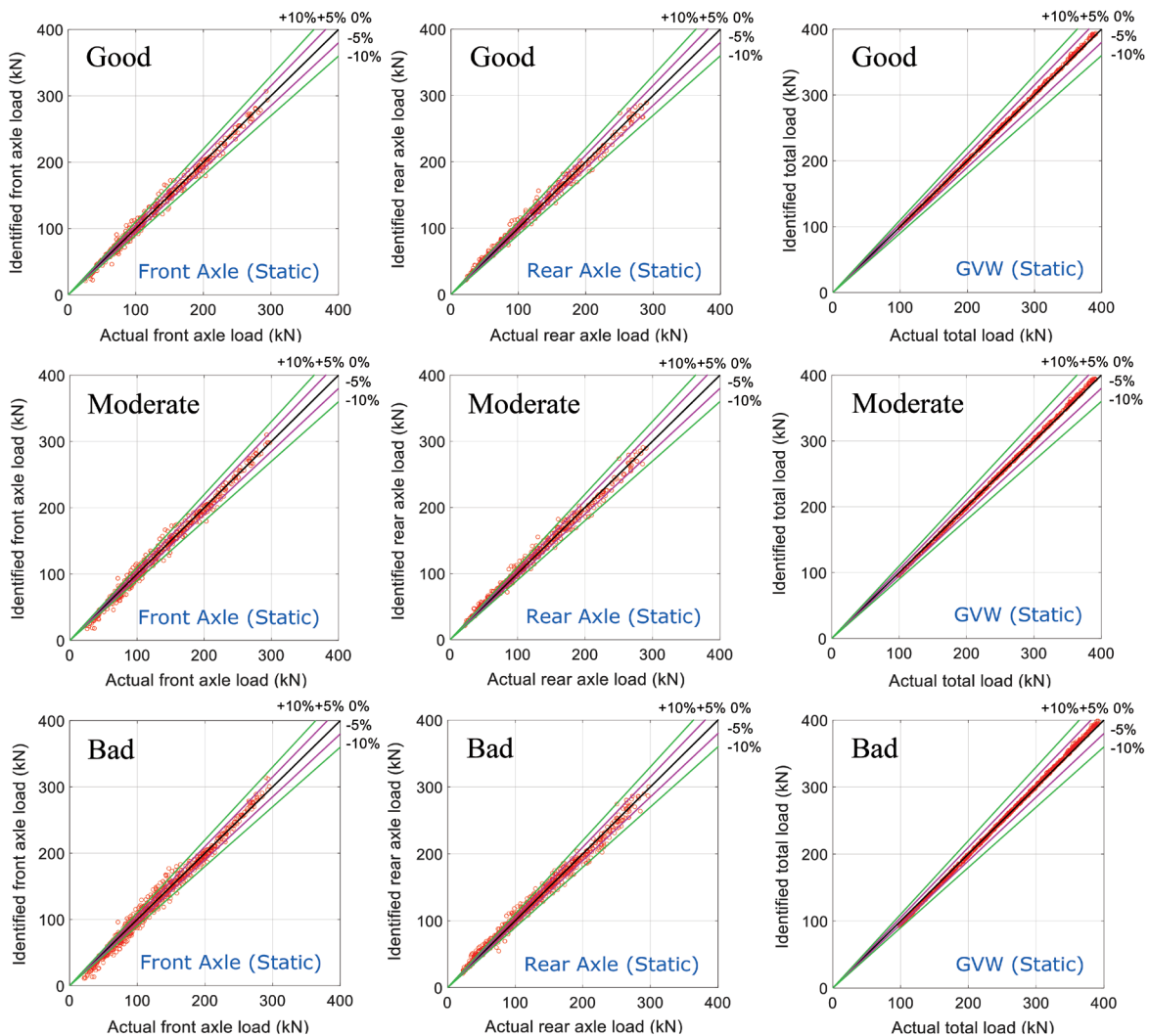
เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากตารางที่ 4 กับ
ผลการวิเคราะห์โดยใช้ผลตอบสนองความเครียด
ด้วยวิธีเดียวกันจากการศึกษาของ Asnachinda &
Pinkaew [26] ด้วยกรณีทดสอบเชิงตัวเลขจากแบบ
จำลองในคอมพิวเตอร์ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันนั้น
มีค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักทรายเพลและน้ำหนัก
รวมในทางสถิตไม่เกิน 10% และ 3% ตามลำดับ ขณะที่
ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของน้ำหนักทรายเพลและน้ำ
หนักรวมทางพลศาสตร์มีค่าไม่เกินประมาณ 22%และ
7% ตามลำดับ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้มีค่าสูง
กว่าการวิเคราะห์โดยใช้ผลตอบสนองการโก่งตัว จึง
พิจารณาได้ว่าการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกโดยใช้
ผลตอบสนองการโก่งตัวแทนการใช้ความเครียดนั้น
มีความถูกต้องสูงกว่าการใช้ผลตอบสนองความเครียด
โดยเฉพาะการวิเคราะห์น้ำหนักทรายเพล

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบการหา น้ำหนักยานพาหนะจากการศึกษาในเชิงสถิติ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพสำหรับการประยุกต์
ระบบ BWIM โดยใช้ผลตอบสนองการโก่งตัว จึง
ทำการศึกษาเชิงสถิติด้วยการสุ่มค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
เพื่อจำลองรถบรรทุกในเหตุการณ์จริงซึ่งอาจมีคุณสมบัติ
ที่แตกต่างกันและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่แน่นอน
ในส่วนนี้ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์บนสภาพพื้นผิวที่มี
ความขรุขระและสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกันสาม
ระดับ ได้แก่

- 1) ระดับดี (Good) โดยมีแอมพลิจูด
ความขรุขระสูงสุด 1 มิลลิเมตรและระดับสัญญาณรบกวน 1%
- 2) ระดับปานกลาง (Moderate) โดยมี
แอมพลิจูดความขรุขระสูงสุด 2 มิลลิเมตรและระดับ
สัญญาณรบกวน 5% และ
- 3) ระดับแย่ (Bad) โดยมีแอมพลิจูด
ความขรุขระสูงสุด 3 มิลลิเมตรและระดับสัญญาณ
รบกวน 10%

ภาพที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาด
เคลื่อนของการหาน้ำหนักทางสถิตที่ระดับความขรุขระ
ของพื้นผิวสะพานและสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน
ซึ่งพบว่าการหาน้ำหนักรวมทางสถิตมีความถูกต้อง
สูงกว่าการหาน้ำหนักทรายเพล และหากสะพานมี
ความขรุขระมากและระดับสัญญาณรบกวนสูงขึ้น
จะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น และผลลัพธ์มี
ความแปรปรวนมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่รถบรรทุก
มีน้ำหนักเบา



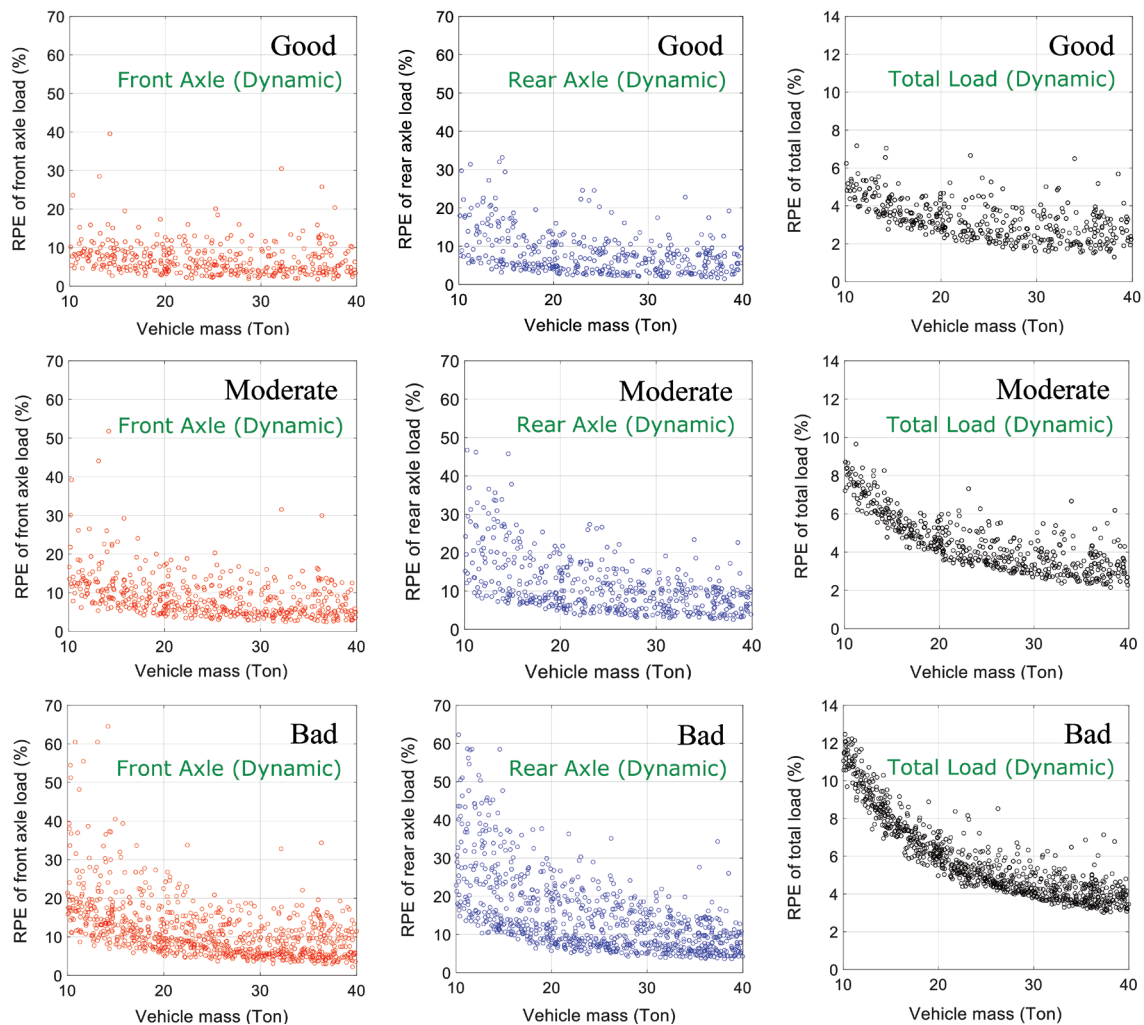
ภาพที่ 8 ผลการเปรียบเทียบระดับความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักทางสถิตของรถบรรทุก
ที่ระดับความขรุขระและสัญญาณรบกวนที่ต่างกัน

สำหรับผลลัพธ์ของการหาแรงทางพลศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 9 พบว่ารถบรรทุกที่มีน้ำหนักหรือมวลมากกว่าจะมีความถูกต้องสูงกว่ารถบรรทุกที่มี น้ำหนักเบาหรือมวลน้อยกว่า โดยค่าความคลาดเคลื่อนของแรงทางพลศาสตร์แปรผันตรงกับแอมพลิจูดของความขรุขระและสัญญาณรบกวนที่สูงขึ้น แต่จะแปรผกผันกับมวลรถบรรทุก และผลการวิเคราะห์น้ำหนัก

รวมมีความถูกต้องสูงกว่าน้ำหนักรายเพล เนื่องจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ทำการวิเคราะห์จากผลตอบสนองที่ตรวจวัดได้ซึ่งเป็นสัญญาณที่รวมผลของน้ำหนักจากทุกเพลของยานพาหนะ โดยกรณีที่เกิดความคลาดเคลื่อนสูงของแรงทางพลศาสตร์ในภาพที่ 9 นั้นนอกเหนือจากผลของความขรุขระและสัญญาณรบกวนซึ่งส่งผลต่อ

แรงกระแทกของน้ำหนักเพลาล้วน พบว่าเป็นผลมาจากกรณีที่ยานพาหนะมีระยะช่วงเพลาคู่แคบและมีสัดส่วนของน้ำหนักถ่ายลงเพลาคู่ที่แตกต่างกันมาก ซึ่งทำให้แรงที่เพลามีความแปรปรวนมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลลัพธ์ของน้ำหนักกรวยเพลาล้วนพบว่าการ

วิเคราะห์กรณีใดที่มีค่าน้ำหนักเพลาคู่เพลาคู่หนึ่งสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่แท้จริงแล้ว จะส่งผลให้น้ำหนักอีกเพลาคู่หนึ่งมีค่าในแนวโน้มด้วยทิศทางตรงกันข้าม จึงส่งผลให้น้ำหนักรวมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง ทั้งการวิเคราะห์น้ำหนักทางสถิตและทางพลศาสตร์



ภาพที่ 9 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของการหาแรงทางพลศาสตร์กับมวลของรถบรรทุก
ที่ระดับความขรุขระและสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักบรรทุกจากการศึกษาเชิงสถิติ

Condition of roughness & noise	Good			Moderate			Bad		
Identification error	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
<i>Static weight error</i>									
Front axle weight (%)	0.01	38.49	4.55	0.00	50.39	5.14	0.00	62.48	6.21
Rear axle weight (%)	0.02	25.61	4.31	0.00	32.37	4.49	0.02	39.34	4.61
Gross weight (%)	0.00	2.34	0.59	0.01	3.70	0.92	0.00	6.42	1.32
<i>RPE of dynamic load</i>									
Front axle load (%)	1.84	39.49	7.14	2.45	51.73	9.05	2.27	64.58	11.69
Rear axle load (%)	1.52	33.18	7.97	2.55	46.70	11.37	3.60	62.26	14.63
Total load (%)	1.31	7.18	3.23	2.16	9.65	4.47	3.02	12.47	5.89

จากรายละเอียดเชิงสถิติซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรวมทางสถิติและทางพลศาสตร์สำหรับกรณีปานกลางมีค่าเฉลี่ยเพียง 0.92% และ 4.47% ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลงหรือสูงขึ้นตามระดับของความขรุขระและสัญญาณรบกวน อีกทั้งพบว่าความถูกต้องของการวิเคราะห์น้ำหนักจะสูงขึ้นเมื่อยานพาหนะมีมวลมากขึ้น ซึ่งแนวโน้มเช่นนี้เป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติของระบบ BWIM เพื่อตรวจสอบการบรรทุกเกินพิกัดโดยยังรถบรรทุกมีน้ำหนักมากเท่าใดจะได้ประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากขึ้น

โดยจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดนั้นอาจพบว่ามีความสูงมาก แต่เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 8 และ 9 แล้วพบว่ากรณีที่มีความคลาดเคลื่อนสูงในการหาน้ำหนักรายละเอียดและมีสัดส่วนที่น้อย โดยเมื่อพิจารณาคูณสมบัติในรายการแล้วพบว่ากรณีที่มีความคลาดเคลื่อนสูงส่วนมากนั้นมาจากกรณีที่ระยะช่วงเพลาคู่ที่แคบและมีสัดส่วนน้ำหนักเพลาคู่ที่ถ่วงน้ำหนักไปเพลาคู่ใดเพลาคู่หนึ่งมากจนอีกเพลาคู่มีน้ำหนักเบาและ

เมื่อคิดความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละแล้วจึงมีค่าสูงและปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการนำระบบ BWIM ไปประยุกต์ใช้คือระดับความขรุขระและสัญญาณรบกวนในการตรวจวัด โดยเฉพาะผลลัพธ์กรณี Bad ซึ่งมีความขรุขระมากและสัญญาณรบกวนสูงนั้นมีผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นจากกรณี Good และ Moderate อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าสะพานที่ติดตั้งระบบ BWIM ควรปรับพื้นผิวสะพานให้มีความราบเรียบหรือบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์อย่างต่อเนื่อง และใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนต่ำหรือใช้การกรองสัญญาณรบกวนให้มีระดับที่ลดลง จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของการหาน้ำหนักบรรทุกทุกมีประสิทธิผลสูงขึ้นได้ ขณะที่ผลของความเร็วในการสัญจรของยานพาหนะนั้นไม่มีนัยสำคัญที่ชัดเจนต่อระดับความถูกต้อง

สำหรับสาเหตุที่ทำให้การหาน้ำหนักด้วยการใช้ผลตอบสนองการโก่งตัวมีประสิทธิภาพที่เทียบเท่าหรือดีกว่าการใช้ผลตอบสนองความเครียดนั้น มีสาเหตุมาจากการแกว่งการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสะพานซึ่งจะได้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งซึ่งสามารถแปลงค่าเป็นการโก่งตัวที่จุดตรวจวัดได้โดยง่าย ขณะที่การใช้

สัญญาณความเครียดหรือโมเมนต์ต่อนั้นมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนตำแหน่งในรูปของอนุพันธ์ตามทฤษฎีอีลาสติกของคาน จึงทำให้การใช้ความเครียดมีประสิทธิภาพน้อยกว่า

ส่วนสำคัญในการประยุกต์อีกประเด็นหนึ่งคือเส้นอินฟลูเอนซ์ที่ของสะพานที่ใช้ในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องทดสอบเพื่อปรับเทียบทุกครั้ง หากมีสภาพผิวทางที่เปลี่ยนแปลงไปจากการซ่อมบำรุง หรือมีการเปลี่ยนอุปกรณ์หรือระบบตรวจวัดสัญญาณ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกที่มีความถูกต้องมากที่สุด

5. สรุปผล

ผลการศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงสถิติของการหาน้ำหนักของรถบรรทุกโดยใช้ผลตอบสนองการโก่งตัวของโครงสร้างสะพานซึ่งผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธียกกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับวิธีเรกูลาร์ไรเซชัน และเพิ่มความถูกต้องด้วยเทคนิคการปรับปรุงองค์ประกอบทางสถิติที่ใช้เส้นอินฟลูเอนซ์การโก่งตัวของสะพานที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรง พบว่าการวิเคราะห์หาน้ำหนักทางสถิติและแรงทางพลศาสตร์ของน้ำหนักกรายเพลและน้ำหนักรวมของรถบรรทุกนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ผลตอบสนองความเครียด โดยสามารถวิเคราะห์โดยเลือกใช้ค่าเรกูลาร์ไรเซชันที่เหมาะสมได้ในช่วงที่กว้างขึ้น โดยมีระดับความถูกต้องสูงกว่าการใช้สัญญาณความเครียดทั้งการหาน้ำหนักทางสถิติและทางพลศาสตร์ โดยเฉพาะผลลัพธ์ของการหาน้ำหนักกรายเพลซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ความเร็วของยานพาหนะไม่มีผลต่อระดับความถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ยานพาหนะซึ่งมีระยะช่วงเพลที่แคบและมีน้ำหนักเพลที่ถ่วงไปเพลใดเพลหนึ่งมากจะทำให้ผลการวิเคราะห์น้ำหนักกรายเพลมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าปกติได้ ในกรณีที่

ความขรุขระของพื้นผิวสะพานและสัญญาณรบกวนในการตรวจวัดอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ทำให้เกิดแรงกระแทกของน้ำหนักเพลประมาณ 20% และสัญญาณรบกวนขนาดประมาณ 5% ของแอมพลิจูดสูงสุด การวิเคราะห์ด้วยการโก่งตัวมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักกรายเพลน้ำหนักรวมทางสถิติไม่เกิน 5.2% และ 1.0% ตามลำดับ ขณะที่ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการหาแรงทางพลศาสตร์รายเพลและน้ำหนักรวมมีค่าไม่เกิน 11.4% และ 4.5% ตามลำดับ โดยรถบรรทุกที่มีมวลมากจะสามารถวิเคราะห์น้ำหนักได้ถูกต้องมากกว่ารถบรรทุกที่มีมวลน้อย และระดับความถูกต้องจะขึ้นกับสภาพความขรุขระและระดับของสัญญาณรบกวนในการตรวจวัด โดยความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักจะสูงขึ้นหากสะพานมีความขรุขระมากขึ้นและระดับสัญญาณรบกวนในการตรวจวัดที่สูงขึ้น

การควบคุมความคลาดเคลื่อนของการหาน้ำหนักรถบรรทุกในการประยุกต์ สามารถกระทำได้โดยพิจารณาเลือกติดตั้งระบบ BWIM กับสะพานที่มีพื้นผิวราบเรียบหรือบำรุงสภาพผิวทางให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์อย่างต่อเนื่อง และใช้เครื่องมือตรวจวัดที่มีคุณสมบัติด้านการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนหรือทำการกรองสัญญาณรบกวนก่อนนำไปวิเคราะห์ผล ทั้งนี้ต้องมีการทดสอบเพื่อปรับเทียบเส้นอินฟลูเอนซ์ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นผิวสะพานและระดับสัญญาณรบกวน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการจัดตั้งหน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน และจากมหาวิทยาลัยบูรพา “ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ

พ.ศ. 2565 งบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.)” เลขที่สัญญา ววน. 61/2565



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Moses F (1979). Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Journal of Transportation Engineering*, 105(3): 233-249.
- [2] Law S S, Chan T H T, and Zheng Q H (1997). Moving force identification: A time domain method. *Journal of Sound and Vibration*, 201(1): 1-22.
- [3] Law S S, Chan T H T, and Zeng Q H (1999). Moving force identification - A frequency and time domains analysis. *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, 121: 394-401.
- [4] Chan T H T, Law S S, Yung T H, and Yuan X R (1999). An interpretive method for moving force identification. *Journal of Sound and Vibration*, 219(3): 503-524.
- [5] Zhu X Q, and Law S S (2000). Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic response. *Journal of Sound and Vibration*, 236(4): 705-724.
- [6] Chan T H T, Law S S, and Yung T H (2000). Moving force identification using an existing prestressed concrete bridge. *Engineering Structures*, 22(1): 1261-1270.
- [7] Law S S, Chan T H T, Zhu Q X, and Zeng Q H (2001). Regularization in moving force identification. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 127(2): 136-148.
- [8] Law S S, Chan T H T, and Zeng Q H (2001). Regularization in moving force identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(2): 136-148.
- [9] Zhu, X. Q., & Law, S. S. (2002). Moving Loads Identification Through Regularization. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 128(5): 989-1000.
- [10] Law S S, and Fang Y L (2001). Moving force identification: Optimal state estimation approach. *Journal of Sound and Vibration*, 239(2): 233- 254.
- [11] Hansen P C (1993). The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 14(6): 1457- 1503.
- [12] Law S S, Bu J Q, Zhu X Q, and Chan S L (2004). Vehicle axle loads identification using finite element method. *Engineering Structures*, 26(8): 1143-1153.
- [13] Yu L, and Chan T H T (2002). Moving force identification from bending moment responses of bridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 14(2): 151-170.
- [14] Zhu X Q, and Law S S (2003). Identification of moving interaction forces with incomplete velocity information. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(6): 1349-1366.
- [15] Pinkaew T (2006). Identification of vehicle axle loads from bridge responses using updated static component technique. *Engineering Structures*, 28(11): 1599-1608.

- [16] Asnachinda P, and Pinkaew T (2007). Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicles from the bending moments of bridges. *Engineering Structures*, 29(9): 2282–2293.
- [17] Asnachinda P, Pinkaew T, and Laman J A (2008). Multiple vehicle axle load identification from continuous bridge bending moment. *Engineering Structure*, 30(10): 2800–2817.
- [18] Deesomsuk T, and Pinkaew T (2009). Effectiveness of vehicle weight estimation from bridge weigh-in motion. *Advances in Civil Engineering*, Article no. 312034.
- [19] Deesomsuk T, and Pinkaew T (2010). Evaluation of effectiveness of vehicle weight estimation using bridge weigh-in-motion. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(2): 96–110.
- [20] O’Brien E J, Quilligan M J, and Karoumi R (2006). Calculating an influence line from direct measurements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering*, 159(1): 31–34.
- [21] O’Brien E J, Rowley C W, Gonzalez A, and Green M F (2009). A regularised solution to the bridge weigh in-motion equations. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 16(3): 310–326.
- [22] Zhao H, Uddin N, O’Brien E J, and Shao X (2014). Identification of vehicular axle weights with a bridge weigh-in-motion system considering transverse distribution of wheel loads. *Journal of Bridge Engineering ASCE*, 19(3): paper ID 1943–5592.0000533.
- [23] Zhao H, Uddin N, and O’Brien E J (2017). Bridge weigh-in-motion algorithms based on the field calibrated simulation mode. *Journal of Infrastructure Systems ASCE*, 23(1): paper ID 04016021.
- [24] Deng L, and Cai C S (2010). Identification of dynamic vehicular axle loads: Theory and simulations. *Journal of Vibration Control*, 16(14): 2167–2194.
- [25] Deng L, and Cai C S (2010). Identification of dynamic vehicular axle loads: Demonstration by a field study. *Journal of Vibration Control*, 17(2): 183–195.
- [26] Asnachinda P, and Pinkaew T (2021). Vehicle axle load identification using extracted bridge influence line via updated static component technique. *Engineering Journal*, 25(5): 45–60.
- [27] Chen Z, Chan T H T, and Nguyen A (2018). Moving force identification based on modified preconditioned conjugated gradient method. *Journal of Sound and Vibration*, 423: 100–117.
- [28] Carraro F, Goncalves M S, Lopez R H, Miguel L F, and Valente A M (2019). Weight estimation on static B-WIM algorithms: A comparative study. *Engineering Structures*, 198: paper ID 109463, p.15.
- [29] Chudong P, Zhenjie H, Junda Y, Yisha L, and Yang L (2021). Moving force identification based on sparse regularization

combined with moving average constraint. *Journal of Sound and Vibration*, 515: paper ID 116496, p.22.

[30] Goncalves M S, Carraro F, and Lopez R H (2021). A B-WIM algorithm considering the modeling of the bridge dynamic response. *Engineering Structures*, 228: paper ID 111533, p.14.

[31] Zhang Z, He W, and Ren W (2022). Moving force identification based on leaning dictionary with double sparsity. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 170: paper ID 10881, p.17.

[32] Jiang R J, Au F T K, and Cheung Y K (2003). Identification of masses moving on multi-span beams based on a genetic

algorithm. *Computers and Structures*, 81: 2137-2148.

[33] Kim S, Lee J, Park M S, and Jo B W (2009). Vehicle signal analysis using artificial neural networks for a bridge weigh-in-motion system. *Sensors*, 9: 7943-7956.

[34] Zhang Q, Jankowski L, and Duan Z (2013). Simultaneous identification of moving vehicles and bridge damages considering road rough surface. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013: paper ID 963424.

[35] ISO 8608 (1995). Mechanical vibration-road surface profiles-Reporting of measured data. Geneva, Switzerland, International Standard Organization.