



บทที่ 7

อภิปรายและสรุปผลของงานวิจัย

สืบเนื่องมาจากความสามารถในการให้บริการของสะพานข้ามแยกซึ่งเป็นสะพานหลักที่เปิดใช้มานานมากนั้น มักมีปัญหาในเรื่องการสั้นไหวของตัวโครงสร้างสะพาน ซึ่งทำใหรรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นภายใต้การเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะในทิศทาง การจราจรฝั่งตรงข้าม จนอาจส่งผลกระทบโดยตรงต่อความรู้สึกรับรู้ได้ถึง การสั่นสะเทือนของ ผู้โดยสารว่ามีความสะดวกสบายมากน้อยเพียงใด หรือแม้กระทั่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยใน ขณะที่กำลังใช้บริการอยู่บนสะพานดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การทำวิจัยเพื่อที่จะปรับปรุง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของสะพานให้ดีขึ้น จนทำให้การสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บน สะพานนั้นลดลง และนำไปสู่การลดผลกระทบต่อความรู้สึกรับรู้ได้ ความสะดวกสบายและสุขภาพ อนามัยของผู้โดยสารด้วยการนำมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวดัดตั้งเข้าไปที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลาง ได้ท้องสะพาน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความหน่วงให้กับสะพานเพราะมีความสะดวกและ รวดเร็ว อีกทั้งสะพานยังคงสามารถเปิดให้บริการได้ตามปกติระหว่างการติดตั้ง

ในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สองมิติขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์ ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของระบบปฏิสัมพันธ์สะพาน-รถยนต์ ทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวล หน่วงปรับค่าซึ่งได้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนมวล 8% ของมวลเชิงโหมด (หรือ 4% ของมวลสะพาน) โดยผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ได้จะมุ่งเน้นไปที่ตัวรถยนต์โดยเฉพาะ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ภายใต้สภาวะการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกและการกระตุ้นจากสภาพ การจราจรจริงที่ฐานรองรับทั้งสองข้างของสะพาน โดยได้พิจารณาถึงผลจากความยาวช่วงของ สะพานและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของรถยนต์ในแบบต่างๆ เพื่อให้ผลการศึกษาคอบคลุมที่สุด อีกทั้งยังได้ทำการประเมินผลการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่อาจส่งผลกระทบต่อความรู้สึก สะดวกสบายและสุขภาพอนามัยของผู้ใช้โดยสารตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ด้วย

ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ภายใต้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกนั้น ชี้ให้เห็นว่าก่อน ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า การสั่นสะเทือนของรถยนต์ในโดเมนของความถี่จะมีความรุนแรงอยู่สอง ย่านความถี่คือ บริเวณความถี่การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของรถยนต์ และบริเวณความถี่ การกระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของสะพานซึ่งบริเวณนี้จะมีความรุนแรงของการสั่นสะเทือน มากกว่า เพราะเกิดการกำทอนระหว่างโครงสร้างสะพานกับการกระตุ้นของฐานรองรับ -โดยที่ ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบริเวณกึ่งกลางสะพานจะสูงกว่าคันอื่น เพราะ เป็นตำแหน่งที่สะพานสั้นตัวมากกว่า ส่วนผลของความถี่ธรรมชาติของรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและช่วง ความยาวสะพานที่สั้นลง จะทำให้การสั่นสะเทือนของตัวรถในรูปของค่าความเร่งมีแนวโน้มเพิ่ม

สูงขึ้นเพราะความถี่ในการสั่นไหวเพิ่มสูงขึ้น ผลของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่านั้นพบว่าจะสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนของตัวรถได้ทั้งสะพานช่วงสั้นและช่วงยาวที่พิจารณา รวมถึงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของรถยนต์แบบต่างๆ แต่การทำงานของมวลหน่วงปรับค่าอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะจำกัดเฉพาะย่านความถี่บริเวณที่ทำการปรับค่า ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพานเท่านั้น โดยจากตัวอย่างการคำนวณพบว่าสามารถลดค่าความเร่งของรถยนต์คันกลางที่จอดติดอยู่ได้ถึงกว่า 60 % ทั้งนี้จะไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนในย่านความถี่ค่าอื่นได้ ซึ่งรวมถึงย่านความถี่เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของรถยนต์ด้วย โดยหากความถี่ดังกล่าวมีค่าไม่ใกล้เคียงกับความถี่ตามธรรมชาติของสะพาน นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงผลของการเบี่ยงเบนค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่า (Detuning) โดยที่อิทธิพลการเกิด Detuning ของค่าอัตราส่วนปรับจูนความถี่ (α) จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์มากกว่าการเกิด Detuning ของค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า (ζ_d) ทั้งนี้กรณีที่ค่าความถี่ช่วงล่างรถน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ($f_c < f_b$) มวลหน่วงปรับค่าจะมีคุณสมบัติ Robustness มากที่สุด ส่วนกรณีการเปลี่ยนแปลงมวลของรถยนต์ พบว่าเมื่อมวลของรถยนต์เพิ่มขึ้น ค่าความเร่งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง แต่มวลของรถยนต์มีแนวโน้มจะส่งผลกระทบน้อยลงหากค่าความถี่ช่วงล่างรถน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ($f_c < f_b$)

สำหรับกรณีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ภายใต้การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงในโดเมนของความถี่ ผลปรากฏเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ใช้การกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค ส่วนกรณีผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ในโดเมนของเวลานั้น มวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพต่ำในช่วงการสั่นสะเทือนในช่วงที่ยาวนานขนาดใหญ่ในการจราจรฝั่งตรงข้ามเคลื่อนที่ผ่านคานขวาง เนื่องจากการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และไม่มีเวลามากพอที่จะกระตุ้นให้มวลหน่วงปรับค่าทำงานหรือเกิดการตอบสนอง อย่างไรก็ตามเมื่อไม่มีเวลายาวนานใหญ่เคลื่อนที่ผ่านคานขวางในการจราจรฝั่งตรงข้าม การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากยวดยานขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ผ่านคานขวางในการจราจรฝั่งตรงข้าม โดยการสั่นสะเทือนในช่วงนี้มวลหน่วงปรับค่าจะสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนลงได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบอีกว่ามวลหน่วงปรับค่าควบคุมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างต่ำ ($f_c < f_b$) ได้ไม่ดีเท่ากับกรณีที่รถยนต์มีความถี่ช่วงล่างสูง ($f_c \geq f_b$) เนื่องจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างต่ำมีความรุนแรงน้อยกว่า นอกเหนือจากนี้ มวลหน่วงปรับค่าที่เลือกใช้ค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.08 มีคุณสมบัติ Robustness ที่ดีซึ่งทำให้ค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุดของรถยนต์มีความแตกต่างจากกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากที่สุดไม่เกิน 1.5 %

แม้ว่าจะเกิด Detuning ของค่า α เบี่ยงเบนไป $\pm 5\%$ และเกิด Detuning ของค่า ζ_d เบี่ยงเบนไป $\pm 15\%$ ก็ตาม

ในส่วนการประเมินการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ภายใต้การกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริง จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ก่อนทำการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่านั้น รถยนต์ที่มีมวลน้อยลงและ/หรือความถี่สูงขึ้น ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ทั้งนี้หากพิจารณารถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างโดยทั่วไปซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-2.5 Hz การสั่นสะเทือนของรถยนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากอยู่ระหว่าง 70-100 % เมื่อความถี่ช่วงล่างของรถยนต์สูงขึ้นเพียง 0.5 Hz แต่การสั่นสะเทือนของรถยนต์จะลดลงเพียงเล็กน้อยประมาณ 1-8 % เพียงเท่านั้น เมื่อรถยนต์มีมวลเพิ่มขึ้น 500 kg เพราะฉะนั้นความถี่ช่วงล่างของรถยนต์จึงมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน และภายหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าจะสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ลงได้ โดยเฉพาะในกรณีที่รถยนต์มีมวลน้อยและความถี่ช่วงล่างเข้าใกล้หรือสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน มวลหน่วงปรับค่าจะสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดบริเวณกึ่งกลางสะพานได้มากกว่าร้อยละ 40 อย่างไรก็ตามในกรณีของรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างโดยทั่วไป (1.0-2.5 Hz) ค่าความเร่งสูงสุดของรถยนต์จะลดลงเพียงแค่ 10-35 % เท่านั้น

ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่วิเคราะห์ได้นั้น ได้ถูกนำไปประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้โดยสารตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ซึ่งการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่มีความถี่ช่วงล่างโดยทั่วไปอันเป็นสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของยวดยานในฝั่งตรงข้ามทั้งในกรณีก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า สามารถส่งผลให้ผู้โดยสารรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนดังกล่าว เนื่องจากค่าความเร่งสูงสุดหลังผ่านการถ่วงน้ำหนักของรถยนต์ที่วิเคราะห์ได้นั้นมีค่าสูงกว่าค่าความเร่งตามเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ซึ่งระบุไว้เท่ากับ 0.015 m/s^2 ทั้งนี้การสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่ผู้โดยสารสามารถรับรู้ได้ในกรณีก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า จะทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายเล็กน้อยจนรู้สึกได้อย่างชัดเจน หากรถยนต์มีความถี่ช่วงล่างอยู่ระหว่าง 2.0-2.5 Hz สำหรับในกรณีที่รถยนต์มีความถี่ช่วงล่างต่ำกว่านี้ผู้โดยสารจะไม่รู้สึกถึงความไม่สะดวกสบาย ผลของการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าพบว่าสามารถช่วยลดระดับผลกระทบต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายลงได้อย่างมีนัยสำคัญโดยสามารถลดผลกระทบได้หนึ่งระดับในกรณีที่รถยนต์มีความถี่ช่วงล่าง 2.0-2.5 Hz แต่ผู้ใช้โดยสารรถยนต์ยังคงรู้สึกได้ถึงความรู้สึกไม่สะดวกสบายขณะใช้บริการสะพาน อย่างไรก็ตามในการประเมินผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายไม่ได้คำนึงถึง

ระยะเวลาที่อยู่ภายใต้การสั่นสะเทือน ซึ่งหากผู้โดยสารอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนเป็นระยะเวลานานๆ แล้ว อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยได้ ดังนั้นจึงได้มีการตรวจสอบผลกระทบดังกล่าว. โดยจากผลการประเมินพบว่าหากรถยนต์ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านสะพานที่ไม่ติดมวลหน่วงปรับค่านานเกินกว่า 1 ชั่วโมง 34 นาที จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้โดยสาร แต่ภายหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณกึ่งกลางช่วงได้ทั้งสะพานจะสามารถช่วยยืดระยะเวลาการอยู่ภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนภายในรถยนต์ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้ใช้โดยสารออกไปได้ประมาณ 1 ชั่วโมง 52 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 119 (ค่า VDV ลดลงประมาณร้อยละ 15) เมื่อเทียบกับกรณีก่อนติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยได้เป็นอย่างดี

จากผลลัพธ์ที่กล่าวมาข้างต้น แม้ว่าได้มีการนำมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดียวมาใช้เพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของรถยนต์จนนำไปสู่การลดการสั่นสะเทือนของตัวสะพานและรถยนต์ที่จอดติดบนสะพาน ซึ่งนำไปสู่การลดผลกระทบต่อผู้ใช้โดยสารตามมาตรฐาน ISO แต่มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดียวซึ่งเป็นประเภท Passive TMD ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการลดการสั่นสะเทือนจนต่ำกว่าระดับที่ผู้โดยสารจะรับรู้ได้ ซึ่งในกรณีดังกล่าวควรได้พิจารณาถึงวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ Passive อาทิเช่น ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ Semi-active หรือแบบ Active หรือระบบมวลหน่วงปรับค่าหลายชุด (MTMD) รวมถึงวิธีการเพิ่มสติฟเนสให้กับสะพาน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวในปัจจุบันยังคงมีราคาแพงกว่าระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ Passive ที่ได้ทำการศึกษา