รายงานฉบับที่ วพ. ๓๒๙ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง

REPORT NO. RD 329 BUREAU OF ROAD RESEARCH AND DEVELOPMENT

การวิเคราะห์ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มโดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาคเพื่อการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทาง

โดย

นายพลเทพ เลิศวรวนิช

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

DEPARTMENT OF HIGHWAYS, MINISTRY OF TRANSPORT

RATCHATHEWI, BANGKOK 10400, THAILAND

การวิเคราะห์ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มโดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาคเพื่อการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทาง

โดย

นาย พลเทพ เลิศวรวนิช

รายงานฉบับที่ วพ. ๓๒๙

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง

กรมทางหลวง

สิงหาคม ๒๕๖๘

ISSN 0125-8044

รายงานนี้เป็นความคิดของผู้เขียนเท่านั้น กรมทางหลวงไม่มีส่วนผูกพันแต่อย่างใด

คำนำ

กรมทางหลวงมีบทบาทสำคัญในการวางแผน ออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษาทางหลวงแผ่นดิน เพื่อสนับสนุนการคมนาคมของประเทศให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัย งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อตอบโจทย์การบริหารจัดการโครงข่ายทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองในบริบทที่ปริมาณการจราจรมีความผันแปรสูง โดยนำเสนอแนวทางวิเคราะห์ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost) บนพื้นฐานของแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทางและช่วงเวลา

ผลการศึกษาไม่เพียงแต่ช่วยสะท้อนต้นทุนทางสังคมที่แท้จริงจากความแออัด แต่ยังเปิดโอกาสให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถออกแบบโครงสร้างราคาแบบไดนามิกที่สอดคล้องกับสภาพการจราจร เพิ่มประสิทธิภาพการใช้โครงข่ายทางหลวง และลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม รูปแบบการกำหนดราคาเช่นนี้มีศักยภาพที่จะต่อยอดใช้ในเส้นทางอื่น ๆ และเป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคมนาคมที่ยั่งยืนของประเทศ

(นายอภิรัฐ ไชยวงศ์น้อย)

อธิบดีกรมทางหลวง

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้พัฒนาแนวทางการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Pricing) โดยอิงจากแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) สำหรับการจัดเก็บค่าผ่านทางตามระยะทางบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ “ทำให้ต้นทุนภายนอกกลายเป็นต้นทุนภายใน” (internalize congestion externalities) ผ่านการปรับอัตราค่าผ่านทางแบบไดนามิกตามสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ โดยใช้ข้อมูลจราจรที่เก็บจากหลายตำแหน่งของเครื่องตรวจนับตามแนวทางหลวง การศึกษานี้ได้สร้าง MFD เชิงประจักษ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของยานพาหนะ (accumulation) และการผลิตของระบบ (production) ซึ่ง MFD นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (average cost) และต้นทุนส่วนเพิ่ม (marginal cost) ต่อกิโลเมตร และนำไปสู่การคำนวณอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมในรูปของต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (marginal external cost) ที่เกิดจากยานพาหนะแต่ละคันที่เพิ่มเข้าสู่ระบบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มหรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม จะมีค่าสูงในช่วงที่มีความแออัดสูง เช่น ช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้าและตอนเย็น ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว ยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นแต่ละคันจะก่อให้เกิดความล่าช้าอย่างมีนัยสำคัญต่อผู้อื่น จึงมีเหตุผลในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่สูงขึ้นเพื่อควบคุมความต้องการใช้ถนน ในทางกลับกัน ในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มจะอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราค่าผ่านทางสามารถลดลงหรือยกเว้นได้ กลยุทธ์การกำหนดราคาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นนี้ สอดคล้องกับหลักการของการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่ม และส่งเสริมการใช้โครงสร้างพื้นฐานทางถนนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กราฟอนุกรมเวลาที่แสดงค่าการผลิต ความเร็วเฉลี่ย และอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม ช่วยให้เห็นภาพพลวัตของการจราจรและศักยภาพในการกำหนดราคาในแต่ละช่วงเวลาอย่างชัดเจน ผลการศึกษายืนยันว่า การกำหนดค่าผ่านทางโดยอิงจาก MFD สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริงและขยายผลได้ในการบริหารจัดการความแออัด การใช้ข้อมูลภาคสนามจริงยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและความเกี่ยวข้องเชิงนโยบายของผลการศึกษา การศึกษานี้สรุปว่า แนวทางการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่มโดยใช้ MFD เป็นกรอบแนวคิดที่สามารถนำมาใช้ออกแบบนโยบายค่าผ่านทางที่มีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายจราจรได้อย่างเหมาะสม สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรให้ความสำคัญกับการพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของผู้ใช้ถนน การบูรณาการกับระบบขนส่งหลายรูปแบบ และการนำไปใช้จริงในระบบจัดเก็บค่าผ่านทางแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแนวทางนี้ให้มากยิ่งขึ้น

Disclaimer

The contents of this report reflect only the views of the authors. Who are responsible for the facts and the accuracy of the data presented herein only. The contents do not necessarily reflect the official views or policies of the Department of Highways, Thailand. This report does not constitute any standard, specification, or regulation.

สารบัญ

หน้า

คำนำ i

บทคัดย่อ ii

สารบัญ iv

1. บทนำ 1
2. การทบทวนวรรณกรรม 5
3. วิธีการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มจากข้อมูล MFD 10
4. การประยุกต์ใช้วิธีการกับทางหลวงพิเศษระหว่าง เมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก 14
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต 23

เอกสารอ้างอิง 26

บทที่ ๑

บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง

ประเทศไทยในฐานะประเทศกำลังพัฒนามีการเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของเมืองอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นศูนย์กลางของกิจกรรมทางเศรษฐกิจ การค้า การขนส่ง และการบริหารราชการแผ่นดิน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจและยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน ในบริบทนี้ ทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “มอเตอร์เวย์” มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงพื้นที่ต่างๆ ของประเทศเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการขนส่งสินค้าและการเดินทางของประชาชนระหว่างภูมิภาค ทางหลวงพิเศษมีลักษณะเด่นคือเป็นถนนที่มีการควบคุมทางเข้าออก (fully access-controlled) มีมาตรฐานความปลอดภัยสูง และสามารถรองรับความเร็วในการเดินทางได้มากกว่าถนนทั่วไป หนึ่งในเส้นทางที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือ ทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 หรือที่รู้จักกันในชื่อ “วงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานคร” ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงข่ายหลักในการกระจายการจราจรจากพื้นที่ใจกลางเมืองไปยังพื้นที่รอบนอก และเชื่อมโยงกับทางหลวงสายหลักอื่น ๆ เช่น ทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 และหมายเลข 6

1.2 ความท้าทายในการบริหารจัดการทางหลวงพิเศษ

แม้ว่าทางหลวงพิเศษจะมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม แต่การบริหารจัดการทางหลวงเหล่านี้ยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายประการ โดยเฉพาะในด้านการจัดเก็บค่าผ่านทางที่เหมาะสม ซึ่งต้องคำนึงถึงทั้งความยั่งยืนทางการเงิน ความเป็นธรรมต่อผู้ใช้ และประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร ในปัจจุบัน การกำหนดอัตราค่าผ่านทางในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงใช้แนวทางแบบคงที่ (flat rate) หรือมีการปรับเปลี่ยนตามระยะทางเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงสภาพการจราจรในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาความแออัดในช่วงเวลาเร่งด่วน และการใช้ถนนอย่างไม่มีประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่มีความต้องการต่ำ

1.3 แนวคิดทางเศรษฐศาสตร์ในการกำหนดค่าผ่านทาง

การกำหนดค่าผ่านทางสามารถแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่:

1.3.1 การกำหนดค่าผ่านทางเพื่อคืนทุน (Cost Recovery Pricing)

แนวทางนี้มีเป้าหมายเพื่อให้ผู้ใช้ถนนมีส่วนร่วมในการรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง บำรุงรักษา และดำเนินงานของโครงสร้างพื้นฐาน โดยอัตราค่าผ่านทางจะถูกกำหนดให้ครอบคลุมต้นทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการ เช่น ค่าก่อสร้าง ค่าซ่อมบำรุง ค่าดำเนินงาน และค่าดอกเบี้ยเงินกู้ ข้อดีของแนวทางนี้คือสามารถสร้างความมั่นคงทางการเงินให้แก่หน่วยงานที่รับผิดชอบ แต่ข้อเสียคือไม่สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรที่เปลี่ยนแปลงได้ และอาจนำไปสู่การใช้ถนนอย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน

1.3.2 การกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด (Congestion Pricing)

แนวทางนี้มีรากฐานมาจากทฤษฎีเศรษฐศาสตร์ของ ต้นทุนภายนอก (externalities) โดยเฉพาะแนวคิดของ Pigou (1920) และ Vickrey (1962) ซึ่งเสนอว่า ผู้ใช้ถนนควรจ่ายค่าผ่านทางในระดับที่สะท้อนถึงผลกระทบที่ตนเองก่อให้แก่ผู้อื่น เช่น ความล่าช้า มลพิษ และการใช้ทรัพยากรเกินความจำเป็น การกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัดจะช่วยให้ผู้ใช้ถนนตระหนักถึงต้นทุนทางสังคมที่ตนเองก่อให้ และปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทาง เช่น การหลีกเลี่ยงช่วงเวลาเร่งด่วน การใช้เส้นทางทางเลือก หรือการเปลี่ยนไปใช้ระบบขนส่งสาธารณะ

1.4. การผสานแนวคิดทั้งสองเข้าด้วยกัน

แม้ว่าแนวคิดทั้งสองจะมีเป้าหมายที่แตกต่างกัน แต่ในทางปฏิบัติสามารถนำมาผสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการกำหนดค่าผ่านทางที่สามารถครอบคลุมต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานในระยะยาว และในขณะเดียวกันสามารถปรับเปลี่ยนตามระดับความแออัดของการจราจรในแต่ละช่วงเวลา การออกแบบระบบค่าผ่านทางที่ผสมผสานทั้งสองแนวคิดนี้จะช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างความยั่งยืนทางการเงินและประสิทธิภาพในการใช้ถนน อีกทั้งยังสามารถตอบสนองต่อเป้าหมายด้านนโยบายสาธารณะ เช่น การลดมลพิษ การส่งเสริมความเท่าเทียม และการเพิ่มคุณภาพชีวิตของประชาชน

1.5 บทบาทของแผนภาพพื้นฐานมหภาค Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)

หนึ่งในเครื่องมือที่มีศักยภาพในการสนับสนุนการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัดคือ Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง:

- Accumulation (A): จำนวนยานพาหนะที่อยู่ในระบบในช่วงเวลาหนึ่ง (veh-hour per time unit)

- Production (P): ระยะทางรวมที่ยานพาหนะเดินทางในช่วงเวลานั้น (veh-km per time unit)

MFD ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบจราจรในระดับเครือข่ายได้อย่างแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลต้นทาง–ปลายทาง (OD data) ซึ่งมักมีความซับซ้อนและต้นทุนสูง การศึกษาของ Geroliminis และ Daganzo (2008) ได้แสดงให้เห็นว่า MFD มีลักษณะเป็นโค้งรูปโดม (unimodal curve) โดยการผลิตจะเพิ่มขึ้นตามการสะสมจนถึงจุดสูงสุด ก่อนที่จะลดลงเมื่อเกิดความแออัด ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่สะท้อนต้นทุนภายนอกได้อย่างแม่นยำ

1.6 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากความสำคัญของการบริหารจัดการทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ซึ่งเป็นโครงข่ายหลักในการรองรับการเดินทางรอบกรุงเทพมหานคร การกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาอย่างรอบด้าน โดยเฉพาะในบริบทของการลดความแออัด การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ถนน และการสร้างความยั่งยืนทางการเงินให้แก่ระบบโครงสร้างพื้นฐาน การศึกษานี้ได้เลือกใช้แนวทางการวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Analysis) บนพื้นฐานของแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบจราจรในระดับเครือข่ายได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ข้อมูลจราจรจริงจากทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อสร้างกราฟ MFD และนำไปสู่การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมตามช่วงเวลา ด้วยเหตุนี้ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้:

- เพื่อสร้างแผนภาพพื้นฐานมหภาค (MFD) ของทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 โดยใช้ข้อมูลจราจรจริงที่เก็บจากระบบตรวจจับอัตโนมัติในช่วงเวลาต่าง ๆ
- เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost) และต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost) ของการเดินทางในแต่ละช่วงเวลา และคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost) ที่เกิดจากยานพาหนะเพิ่มเติมในระบบ
- เพื่อเสนอแนวทางการกำหนดอัตราค่าผ่านทางแบบไดนามิกตามช่วงเวลา (Time-Varying Toll) ที่สะท้อนต้นทุนภายนอกอย่างเหมาะสม โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความแออัดและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้โครงข่ายถนน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาอย่างเป็นระบบ รายงานฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีลำดับการนำเสนอที่สอดคล้องกับกระบวนการวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้แนวคิด Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) ร่วมกับการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost) ดังนี้:

- บทที่ 2 จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดด้านเศรษฐศาสตร์การจราจร การกำหนดค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่ม และการประยุกต์ใช้ MFD ในการวิเคราะห์ระบบจราจร
- บทที่ 3 จะนำเสนอวิธีการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มจากข้อมูล MFD โดยอธิบายสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแนวทางการแปลงข้อมูลจราจรให้เป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์
- บทที่ 4 จะเป็นการประยุกต์ใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้นกับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก โดยใช้ข้อมูลจราจรจริงในการสร้าง MFD และคำนวณอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา
- บทที่ 5 จะสรุปผลการศึกษา พร้อมทั้งอภิปรายข้อค้นพบ ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย และแนวทางการวิจัยในอนาคต

บทที่ ๒

การทบทวนวรรณกรรม

การกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่สะท้อนต้นทุนทางสังคมอย่างแท้จริงเป็นหนึ่งในแนวทางสำคัญในการบริหารจัดการความแออัดบนโครงข่ายถนน โดยเฉพาะในบริบทของเมืองใหญ่หรือทางหลวงพิเศษที่มีปริมาณการจราจรหนาแน่น งานวิจัยในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้พัฒนาแนวคิดและเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมจราจรเพื่อรองรับการกำหนดค่าผ่านทางอย่างมีประสิทธิภาพ บทนี้จะทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องใน 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) แนวคิดการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด (Congestion Pricing) (2) การวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Analysis) และ (3) แนวคิด Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) และการประยุกต์ใช้ในการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม

2.1 แนวคิดการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด (Congestion Pricing)

แนวคิดการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด (Congestion Pricing) มีรากฐานมาจากทฤษฎีเศรษฐศาสตร์ของ A.C. Pigou (1920) ซึ่งเสนอว่าผู้ใช้ถนนควรจ่ายค่าธรรมเนียมที่สะท้อนถึงต้นทุนภายนอก (external cost) ที่ตนเองก่อให้แก่ผู้อื่น เช่น ความล่าช้า มลพิษ และการใช้ทรัพยากรเกินความจำเป็น แนวคิดนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย William Vickrey (1969) ซึ่งเสนอว่าอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมควรเท่ากับความแตกต่างระหว่างต้นทุนทางสังคมส่วนเพิ่ม (Marginal Social Cost) และต้นทุนส่วนบุคคลเฉลี่ย (Average Private Cost)

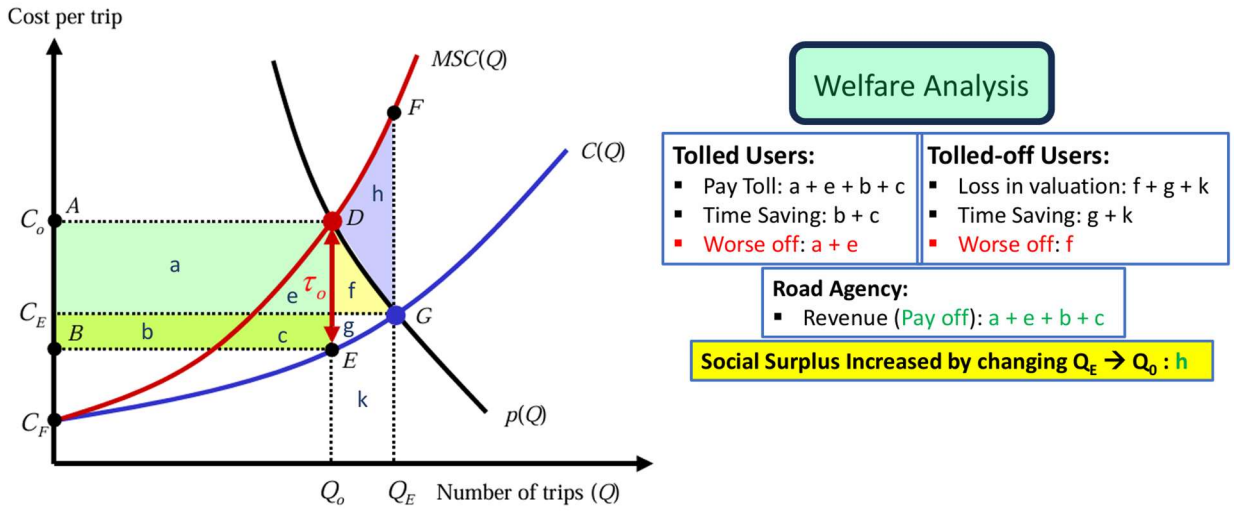
แนวคิดนี้ได้รับการสนับสนุนอย่างกว้างขวางในวงการเศรษฐศาสตร์การขนส่ง โดยเฉพาะในงานของ Small และ Verhoef (2007) ซึ่งเสนอกรอบแนวคิดที่ครอบคลุมการกำหนดค่าผ่านทางในบริบทของเมือง โดยคำนึงถึงความแตกต่างของผู้ใช้ถนนและสภาพการจราจรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พวกเขาเน้นว่าอัตราค่าผ่านทางควรมีความยืดหยุ่นตามช่วงเวลา (time-of-day pricing) และควรสะท้อนถึงลักษณะของผู้ใช้ เช่น ประเภทของยานพาหนะหรือระดับรายได้

Kaddoura (2015) ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ในกรุงเบอร์ลิน โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมผู้ใช้ถนน (agent-based simulation) เพื่อประเมินผลกระทบของการกำหนดค่าผ่านทางแบบไดนามิก พบว่าการกำหนดค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่มสามารถลดความแออัดได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน

Hearn และ Ramana (1998) ได้เสนอแบบจำลองการจัดสรรการจราจรแบบเหมาะสมต่อระบบ (system-optimal traffic assignment) โดยใช้หลักการของ Wardrop เพื่อกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่ลดต้นทุนรวมของ

ระบบ ซึ่งสนับสนุนแนวคิดการกำหนดค่าผ่านทางตามต้นทุนภายนอก นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบต่อผู้ใช้ถนน โดยแสดงให้เห็นว่าแม้ผู้ใช้บางกลุ่มอาจ “เสียประโยชน์” จากการจ่ายค่าผ่านทาง แต่สังคมโดยรวมจะได้รับประโยชน์จากการลดความแออัดและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจราจร ซึ่งสะท้อนผ่านการเพิ่มขึ้นของ “ส่วนเกินทางสังคม” (social surplus)

หนึ่งในข้อได้เปรียบที่สำคัญของการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัดคือการเพิ่มขึ้นของ “ส่วนเกินทางสังคม” (Social Surplus) ซึ่งหมายถึงผลประโยชน์สุทธิที่สังคมได้รับจากการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อมีการกำหนดค่าผ่านทางตามต้นทุนภายนอก ผู้ใช้ถนนบางส่วนจะเปลี่ยนพฤติกรรม เช่น เปลี่ยนเวลาเดินทาง หลีกเลี่ยงเส้นทางที่แออัด หรือหันไปใช้ระบบขนส่งสาธารณะ ส่งผลให้ปริมาณรถในระบบลดลง ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และเวลาการเดินทางลดลงโดยรวม แม้ว่าผู้ใช้บางกลุ่มอาจ “เสียประโยชน์” จากการต้องจ่ายค่าผ่านทาง แต่ผู้ใช้กลุ่มอื่น ๆ จะได้รับประโยชน์จากการเดินทางที่รวดเร็วขึ้น และหน่วยงานรัฐจะได้รับรายได้จากค่าผ่านทาง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบขนส่งหรือคืนกลับสู่สังคมในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การลงทุนในระบบขนส่งสาธารณะ หรือการให้ส่วนลดแก่ผู้มีรายได้น้อย ผลลัพธ์โดยรวมคือ “ส่วนเกินทางสังคม” เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการใช้ทรัพยากรถนนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นเป้าหมายสูงสุดของนโยบายการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: แผนผังแสดง Social Surplus Diagram

แผนภาพนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการกำหนดค่าผ่านทาง (toll) ต่อผู้ใช้ถนนและต่อสวัสดิการทางสังคมโดยรวม โดยแบ่งผู้ใช้ถนนออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่:

1. ผู้ใช้ที่ยังคงใช้ถนนแม้มีการเก็บค่าผ่านทาง (Tolled Users)

- ต้องจ่ายค่าผ่านทาง: a + e + b + c
- ได้รับประโยชน์จากการประหยัดเวลา: b + c
- เสียประโยชน์สุทธิ: a + e (ค่าผ่านทางที่จ่ายเกินกว่าประโยชน์ที่ได้รับ)

2. ผู้ใช้ที่เปลี่ยนพฤติกรรมหรือเลี่ยงการใช้ถนน (Tolled-off Users)

- สูญเสียความพึงพอใจจากการไม่ได้ใช้ถนน: f + g + k
- ประหยัดเวลา (จากการไม่ต้องเผชิญความแออัด): g + k
- เสียประโยชน์สุทธิ: f

3. หน่วยงานรัฐหรือผู้ให้บริการถนน (Road Agency)

- ได้รับรายได้จากค่าผ่านทาง: a + e + b + c

4. สวัสดิการทางสังคมที่เพิ่มขึ้น (Social Surplus)

- พื้นที่ h ในแผนภาพ: แสดงถึงผลประโยชน์สุทธิที่สังคมได้รับจากการลดความแออัด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนปริมาณการใช้ถนนจากระดับที่ไม่มีค่าผ่านทาง (Q_E) ไปสู่ระดับที่มีค่าผ่านทาง (Q_0)

สามารถกล่าวได้ว่าการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัดช่วยลดปริมาณการใช้ถนนในช่วงที่มีความต้องการสูง ผู้ใช้บางส่วนอาจเสียประโยชน์ แต่สังคมโดยรวมได้รับประโยชน์จากการลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ รายได้จากค่าผ่านทางสามารถนำไปใช้เพื่อชดเชยผลกระทบด้านความเป็นธรรม หรือพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ พื้นที่ “h” ในแผนภาพคือหลักฐานเชิงทฤษฎีที่แสดงว่า Congestion Pricing สามารถเพิ่ม “ส่วนเกินทางสังคม” ได้จริง

2.2 การวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Analysis) เป็นเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงหน่วยสุดท้ายของกิจกรรมหนึ่ง ๆ ต่อระบบโดยรวม ในบริบทของการจราจร ต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost: MC) หมายถึงต้นทุนเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นเมื่อมีรถยนต์เพิ่มขึ้นหนึ่งคันในระบบ ซึ่งรวมถึงทั้งต้นทุนส่วนบุคคล (เช่น เวลาเดินทางของผู้ขับขี่) และต้นทุนภายนอก (เช่น ความล่าช้าที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ถนนคนอื่น ๆ)

ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างต้นทุนส่วนเพิ่ม (MC) และต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost: AC) ในทางปฏิบัติ การคำนวณ MEC อย่างแม่นยำต้องอาศัยข้อมูลจราจรที่ละเอียด เช่น ความเร็ว ปริมาณรถ และความหนาแน่นในแต่ละช่วงเวลา รวมถึงเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบจราจรในระดับเครือข่ายได้อย่างแม่นยำ เช่น Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) แม้ว่าการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัดจะมีเป้าหมายหลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจราจร แต่ในทางปฏิบัติ หน่วยงานที่รับผิดชอบยังต้องพิจารณาถึงความสามารถในการคืนทุน (cost recovery) ด้วย กล่าวคือ รายได้จากค่าผ่านทางควรเพียงพอที่จะครอบคลุมต้นทุนในการดำเนินงาน บำรุงรักษา และการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐาน

แนวคิดการคืนทุน (Cost Recovery Pricing) มีพื้นฐานจากหลักการ “ผู้ใช้เป็นผู้จ่าย” (user-pays principle) โดยกำหนดอัตราค่าผ่านทางให้ครอบคลุมต้นทุนเฉลี่ยของโครงการ เช่น ค่าก่อสร้าง ค่าซ่อมบำรุง และค่าดำเนินงาน จุดเด่นของแนวทางนี้คือความมั่นคงทางการเงิน แต่ข้อเสียคือไม่สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรที่เปลี่ยนแปลงได้ และอาจนำไปสู่การใช้ถนนอย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน ทฤษฎีการคืนทุน (Cost-Recovery Theorem) ระบุว่า ภายใต้เงื่อนไขบางประการ การกำหนดค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่มอาจไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมต้นทุนทั้งหมดของระบบ โดยเฉพาะในช่วงที่มีความต้องการใช้ถนนต่ำ ซึ่งอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมอาจใกล้ศูนย์ อย่างไรก็ตาม การศึกษาหลายฉบับ เช่น ของ Mohring (1970) และ Small & Verhoef (2007) ได้เสนอว่า หากมีการออกแบบระบบค่าผ่านทางอย่างเหมาะสม เช่น การใช้ระบบปิด (closed toll system) การกำหนดอัตราขั้นต่ำ หรือการใช้รายได้จากช่วงเวลาเร่งด่วนมาชดเชยช่วงเวลาที่มีความต้องการต่ำ ก็สามารถทำให้ระบบมีความสามารถในการคืนทุนได้ในระยะยาว

2.3 แผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) และการประยุกต์ใช้ในการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม

แผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) เป็นแนวคิดที่พัฒนาโดย Geroliminis และ Daganzo (2008) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจราจรในระดับเครือข่าย ได้แก่:

- การสะสมของยานพาหนะ (Accumulation: A) หมายถึงจำนวนยานพาหนะที่อยู่ในระบบในช่วงเวลาหนึ่ง หน่วยเป็นยานพาหนะ-ชั่วโมงต่อหน่วยเวลา (veh-hour per time unit)
- การผลิตของระบบ (Production: P) หมายถึงระยะทางรวมที่ยานพาหนะทั้งหมดเดินทางในช่วงเวลานั้น หน่วยเป็นยานพาหนะ-กิโลเมตรต่อหน่วยเวลา (veh-km per time unit)

แผนภาพ MFD มักมีลักษณะเป็นโค้งรูปโดม โดยการผลิตจะเพิ่มขึ้นตามการสะสมจนถึงจุดสูงสุด (critical accumulation) ก่อนที่จะลดลงเมื่อเกิดความแออัด (congestion) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบจราจรในแต่ละช่วงเวลา

การศึกษาของ Cassidy, Jang และ Daganzo (2011) ได้แสดงให้เห็นว่า MFD สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบจราจรในระดับเครือข่ายได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะในระบบทางหลวงที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายแบบปิด (closed system) ซึ่งมีความสม่ำเสมอของการไหลของจราจรสูง พวกเขาได้พิสูจน์ว่า MFD สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการจราจรและกำหนดนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Saberi et al. (2014) ได้ขยายแนวคิดของ Edie ในการวัดตัวแปรจราจรให้ครอบคลุมระดับเครือข่าย โดยใช้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบสามมิติ (3D vehicle trajectories) เพื่อสร้าง MFD ที่แม่นยำยิ่งขึ้น การศึกษานี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการกำหนดนิยามของตัวแปรจราจรอย่างสอดคล้องกันในระดับเครือข่าย เพื่อให้สามารถใช้ MFD ได้อย่างถูกต้อง

Zhou (2013) และ Laval et al. (2024) ได้แสดงให้เห็นว่า MFD สามารถสร้างได้จากข้อมูลจาก loop detectors และ GPS probe vehicles ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความหนาแน่น และการไหลของการจราจร โดยเฉพาะในระบบทางหลวงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับอย่างต่อเนื่อง

ในบริบทของประเทศไทย Suwanno (2021) และ Suwanno et al. (2021) ได้ประยุกต์ใช้ MFD ในการวิเคราะห์ผลกระทบของน้ำท่วมต่อระบบจราจรในกรุงเทพมหานคร โดยใช้ MFD เป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการจัดการจราจรในสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น การปิดถนน การเบี่ยงเส้นทาง และการควบคุมปริมาณรถเข้าสู่พื้นที่น้ำท่วม

Zheng et al. (2012) ได้เสนอการผสาน MFD เข้ากับแบบจำลองพฤติกรรมผู้ใช้ถนน (agent-based model) เพื่อออกแบบระบบเก็บค่าผ่านทางแบบไดนามิกในเขตเมือง ซึ่งสามารถปรับอัตราค่าผ่านทางตามสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ และสะท้อนพฤติกรรมของผู้ใช้ถนนที่หลากหลาย การศึกษานี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการรวม MFD เข้ากับแบบจำลองพฤติกรรมเพื่อให้สามารถออกแบบนโยบายที่มีความยืดหยุ่นและเป็นธรรม

Balzer และ Leclercq (2022) ได้เสนอการใช้คุณลักษณะแบบไดนามิกของ MFD ในการกำหนดค่าผ่านทาง โดยเน้นการตอบสนองต่อความแออัดในช่วงเวลาสั้น ๆ และการเปลี่ยนแปลงของความต้องการใช้ถนน การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า MFD ไม่เพียงแต่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติเชิงเวลาเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้ในการควบคุมแบบเรียลไทม์ได้ด้วย

บทที่ ๓

วิธีการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มจากข้อมูล MFD

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทาง โดยอิงจากต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) ที่เกิดจากความแออัดของการจราจรบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก โดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) ที่สร้างจากข้อมูลจราจรภาคสนามจริง กระบวนการศึกษาประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่:

- การสร้าง MFD จากข้อมูลจราจรภาคสนาม
- การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC) จาก MFD

3.1 การสร้างแผนภาพพื้นฐานมหภาค (MFD) จากข้อมูลจราจรภาคสนาม

แผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) เป็นเครื่องมือที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมของยานพาหนะในระบบ (Accumulation: A) กับปริมาณการผลิตของระบบ (Production: P) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการจราจรในระดับเครือข่าย

3.1.1 ข้อมูลที่ใช้

ข้อมูลจราจรถูกเก็บจากระบบตรวจนับอัตโนมัติ (microwave detectors) ที่ติดตั้งตามจุดต่าง ๆ บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 โดยเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน พ.ศ. 2566 ข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย:

- ปริมาณรถ (vehicles/hour)
- ความเร็วเฉลี่ย (km/h)
- ประเภทของยานพาหนะ
- ช่วงเวลาเก็บข้อมูล: ทุก 15 นาที

3.1.2 การคำนวณตัวแปรหลัก

จากข้อมูลที่เก็บได้ จะนำมาคำนวณตัวแปรหลัก 2 ตัว ได้แก่:

- การผลิตของระบบ (Production: P) หมายถึงระยะทางรวมที่ยานพาหนะทั้งหมดเดินทางในช่วงเวลา 15 นาที

$$P = \sum_{i=1}^{n} q_i L_i$$

โดยที่ q_iคืออัตราการไหลของยานพาหนะที่จุดตรวจจับที่ i (veh/h) และ

L_i คือความยาวของช่วงถนนที่จุดตรวจจับนั้นครอบคลุม (km)

- การสะสมของยานพาหนะ (Accumulation: A) หมายถึงจำนวนยานพาหนะที่อยู่ในระบบในช่วงเวลาเดียวกัน

$$A = \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i L_i}{v_i}$$

โดยที่ v_i คือความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่จุดตรวจจับที่ i (km/h)

3.1.3 การสร้างแผนภาพพื้นฐานมหภาค MFD

เมื่อได้ค่าของ A และ P สำหรับแต่ละช่วงเวลา 15 นาที จะนำมาพล็อตเป็นจุดข้อมูลในระนาบสองมิติ โดยแกน X คือ Accumulation (veh-hour/15-min) และแกน Y คือ Production (veh-km/15-min) ผลลัพธ์ที่ได้คือแผนภาพ MFD ซึ่งแสดงลักษณะของระบบจราจรในแต่ละช่วงเวลา

แผนภาพที่ได้มักมีลักษณะเป็นโค้งรูปโดม โดย:

- ช่วงต้นของโค้ง: การผลิตเพิ่มขึ้นตามการสะสม (free-flow)
- จุดสูงสุด: จุดวิกฤต (critical accumulation)
- ช่วงปลายของโค้ง: การผลิตลดลงเมื่อการสะสมเพิ่มขึ้น (congested regime)

3.2 การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) จาก MFD

เมื่อได้แผนภาพ MFD แล้ว สามารถนำมาใช้ในการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่สะท้อนต้นทุนทางสังคม

3.2.1 แนวคิดพื้นฐาน

ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) หมายถึงต้นทุนที่ผู้ใช้ถนนหนึ่งคันก่อให้แก่ผู้อื่นโดยการเพิ่มความแออัดในระบบ โดยสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost: MC) และต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost: AC)

$$MEC = MC - AC$$

3.2.2 การคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (AC)

ต้นทุนเฉลี่ยต่อคันต่อกิโลเมตร (หน่วย: ชั่วโมง/คัน/กม.) คำนวณจากอัตราส่วนของการสะสมต่อการผลิต:

$$AC = \frac{A}{P}$$

3.2.3 การคำนวณต้นทุนส่วนเพิ่ม (MC)

ต้นทุนส่วนเพิ่มคำนวณจากอนุพันธ์ของต้นทุนรวมต่อการการสะสมของยานพาหนะโดยใช้สูตร:

$$MC = \frac{d\{\frac{A}{P} \cdot A\}}{dA}$$

$$MC = 2\frac{A}{P} - (\frac{A}{P})^2 \frac{dP(A)}{dA}$$

ในทางปฏิบัติ ใช้การประมาณเชิงตัวเลขจากจุดข้อมูลใน MFD โดยการหาความชันของเส้นสัมผัสที่แต่ละจุด

3.2.4 การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC)

เมื่อได้ค่า AC และ MC แล้ว สามารถคำนวณ MEC ได้ทันที:

$$MEC = MC - AC$$

$$MEC = \frac{A}{P} - (\frac{A}{P})^2 \frac{dP(A)}{dA}$$

3.2.5 การแปลง MEC เป็นอัตราค่าผ่านทาง

โดยการคูณ MEC กับมูลค่าของเวลา (Value of Time: VOT) จะได้อัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมในหน่วยบาทต่อคันต่อกิโลเมตร:

$$Optimal\ Toll\ (OT) = MEC \times VOT$$

$$OT = [\frac{A}{P} - (\frac{A}{P})^2 \frac{dP(A)}{dA}] \cdot VOT$$

โดยที่ VOT ในการศึกษานี้ใช้ค่าเท่ากับ 178.6 บาท/ชั่วโมง/คัน (อ้างอิงจากกรมทางหลวง, 2566)

บทที่ ๔

การประยุกต์ใช้วิธีการกับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข ๙ ด้านตะวันออก

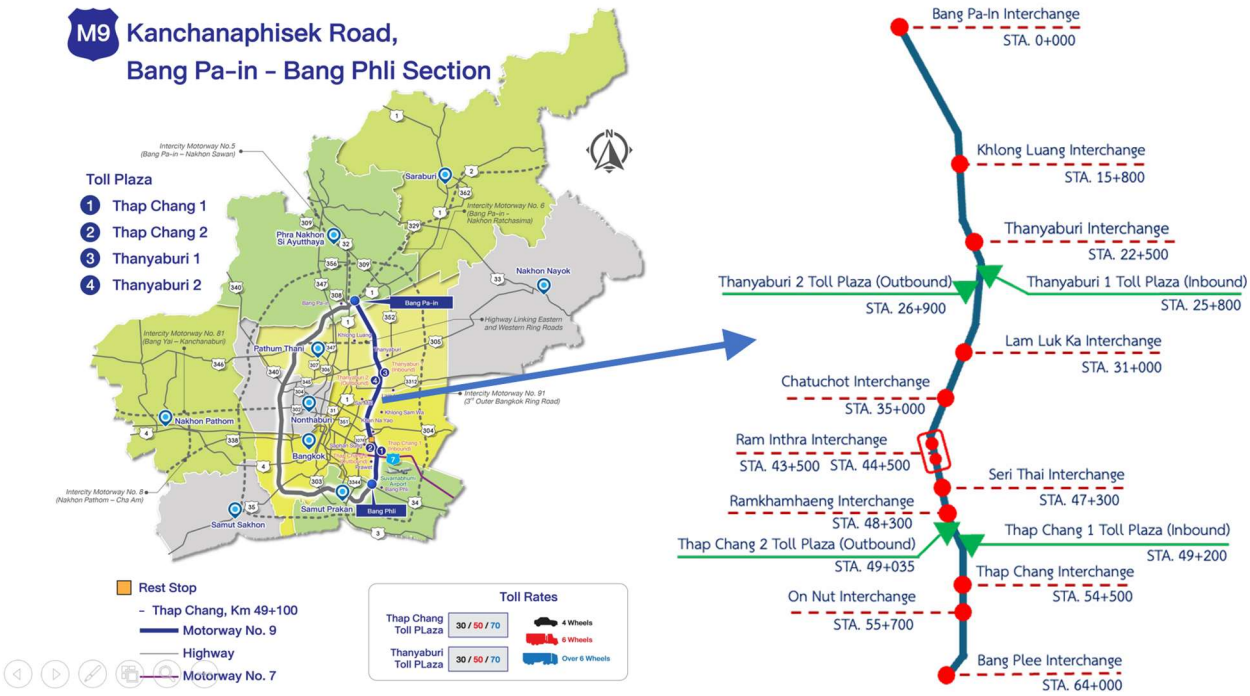
การศึกษานี้ได้นำแนวทางการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) จากแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) ที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 มาประยุกต์ใช้กับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก (Motorway No. 9 East Section) ซึ่งเป็นโครงข่ายทางหลวงที่มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงพื้นที่รอบกรุงเทพมหานคร โดยมีรายละเอียดและผลการประยุกต์ใช้ดังนี้

4.1 รายละเอียดของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก

ทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ด้านตะวันออกเป็นส่วนหนึ่งของวงแหวนรอบนอกกรุงเทพมหานคร (Outer Ring Road) ซึ่งมีลักษณะเป็นทางหลวงพิเศษควบคุมทางเข้าออก (fully access-controlled) และมีการจัดเก็บค่าผ่านทางแบบระบบเปิด (open system) ข้อมูลทางกายภาพและการดำเนินงานของทางหลวงมีดังนี้:

- ระยะทางรวม: ประมาณ 64.5 กิโลเมตร
- จำนวนช่องจราจร: 4 ช่องจราจรต่อทิศทาง (รวม 8 ช่องจราจร)
- จำนวนจุดทางแยกต่างระดับ: 11 แห่ง
- จำนวนด่านเก็บค่าผ่านทาง: 4 แห่ง ได้แก่ ด่านทับช้าง 1 ด่านทับช้าง 2 ด่านธัญบุรี 1 และ ด่านธัญบุรี 2
- อัตราค่าผ่านทางปัจจุบัน: รถยนต์นั่งส่วนบุคคล 30 บาท รถบรรทุก 6 ล้อ 50 บาท รถบรรทุกมากกว่า 6 ล้อ 70 บาท

โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1: แผนผังแสดงทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก

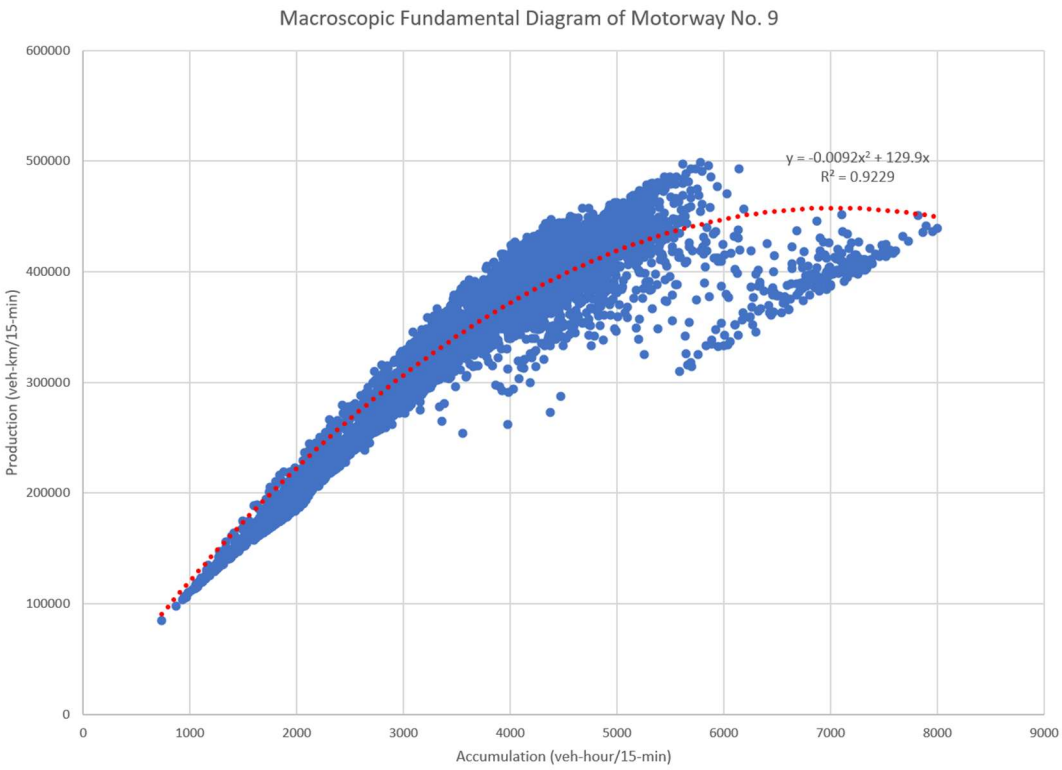
รูปที่ 4.2: รูปแบบการจัดช่องจราจรบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก

4.2 การประยุกต์ใช้วิธีการในบทที่ 3 เพื่อคำนวณอัตราค่าผ่านทาง

การประยุกต์ใช้แนวทางการคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC) จาก MFD ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้:

4.2.1 การสร้าง MFD จากข้อมูลจราจรจริง

จากข้อมูลจราจรที่สำรวจมาจากอุปกรณ์นับรถระหว่างมกราคมถึงเมษายน 2566 พบสภาพการจราจรทั้งสภาพการจราจรคล่องตัวและสภาพการจราจรติดขัด พบว่าปริมาณการเดินทางรวม (VKT) บนทางหลวงนี้โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 29.76 ล้านคัน-กิโลเมตรต่อวัน ในการสร้างแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) สำหรับพื้นที่ศึกษา ได้มีการใช้วิธีการอย่างเป็นระบบโดยอาศัยข้อมูลจากเครื่องตรวจนับการจราจร กระบวนการเริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูลการไหลของรถ (flow) และความเร็ว (speed) จากหลายตำแหน่งของเครื่องตรวจนับที่กระจายอยู่ตามแนวทางหลวง เครื่องตรวจจับเหล่านี้จะบันทึกสภาพการจราจรในช่วงเวลาที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปคือทุก ๆ 15 นาที ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์พลวัตของการจราจรทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ได้อย่างละเอียด สำหรับแต่ละช่วงเวลา 15 นาที จะมีการคำนวณค่าระยะทางรวมที่รถทั้งหมดเดินทาง (Vehicle-Kilometers Traveled: VKT) และเวลารวมที่รถใช้ในระบบ (Vehicle-Hours Traveled: VHT) ณ ตำแหน่งเครื่องตรวจนับแต่ละจุด โดย VKT คำนวณจากการนำค่าการไหลของรถ (คัน/ชั่วโมง) คูณกับระยะทางที่รถเดินทางผ่านจุดนั้น ซึ่งให้ผลรวมเป็นระยะทางทั้งหมดที่รถทุกคันเดินทางผ่านจุดนั้น ส่วน VHT คำนวณโดยนำค่า VKT หารด้วยความเร็วเฉลี่ย ซึ่งแสดงถึงเวลารวมที่รถใช้ในระบบ เมื่อได้ค่า VKT และ VHT จากแต่ละจุดตรวจจับแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการรวมค่าทั้งหมดจากทุกตำแหน่งเพื่อให้ได้ตัวชี้วัดในระดับเครือข่าย โดยผลรวมของ VKT จากทุกตำแหน่งจะให้ค่าการผลิตของระบบ (Production) ซึ่งสะท้อนถึงผลผลิตรวมในรูปของระยะทางที่รถทั้งหมดเดินทาง ส่วนผลรวมของ VHT จะให้ค่าการสะสมของระบบ (Accumulation) ซึ่งแสดงถึงเวลารวมที่รถทั้งหมดใช้ในเครือข่ายถนนในช่วงเวลานั้น ค่าการผลิตและการสะสมที่ได้จะถูกจับคู่กันในแต่ละช่วงเวลา 15 นาที เพื่อสร้างชุดข้อมูลแบบอนุกรมเวลา จากนั้นนำมาพล็อตเป็นกราฟโดยใช้ค่าการสะสมเป็นแกน X และค่าการผลิตเป็นแกน Y ซึ่งจะได้แผนภาพพื้นฐานมหภาค (MFD) ที่แสดงลักษณะการทำงานโดยรวมของเครือข่ายทางหลวง กราฟที่ได้มักมีลักษณะเป็นโค้งแบบยอดเดียว (unimodal shape) โดยค่าการผลิตจะเพิ่มขึ้นตามค่าการสะสมจนถึงจุดวิกฤต (critical point) หลังจากนั้น หากมีการสะสมเพิ่มขึ้นอีก จะทำให้ค่าการผลิตลดลงเนื่องจากเกิดความแออัด แผนภาพ MFD ที่ได้จากข้อมูลจริงนี้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์พฤติกรรมการจราจร ระบุจุดเริ่มต้นของความแออัด และใช้ในการออกแบบกลยุทธ์การจัดการจราจรแบบไดนามิก เช่น การกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามความแออัด การใช้ข้อมูลจากเครื่องตรวจจับแบบเรียลไทม์และการรวมข้อมูลให้เป็นตัวชี้วัดระดับเครือข่าย ทำให้ MFD เป็นเครื่องมือที่ให้ภาพรวมของการไหลของจราจรในเชิงมหภาคได้อย่างชัดเจนและอิงจากสภาพจริง แผนภาพ MFD ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3: แผนภาพ MFD ของทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออก

4.2.2 การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC)

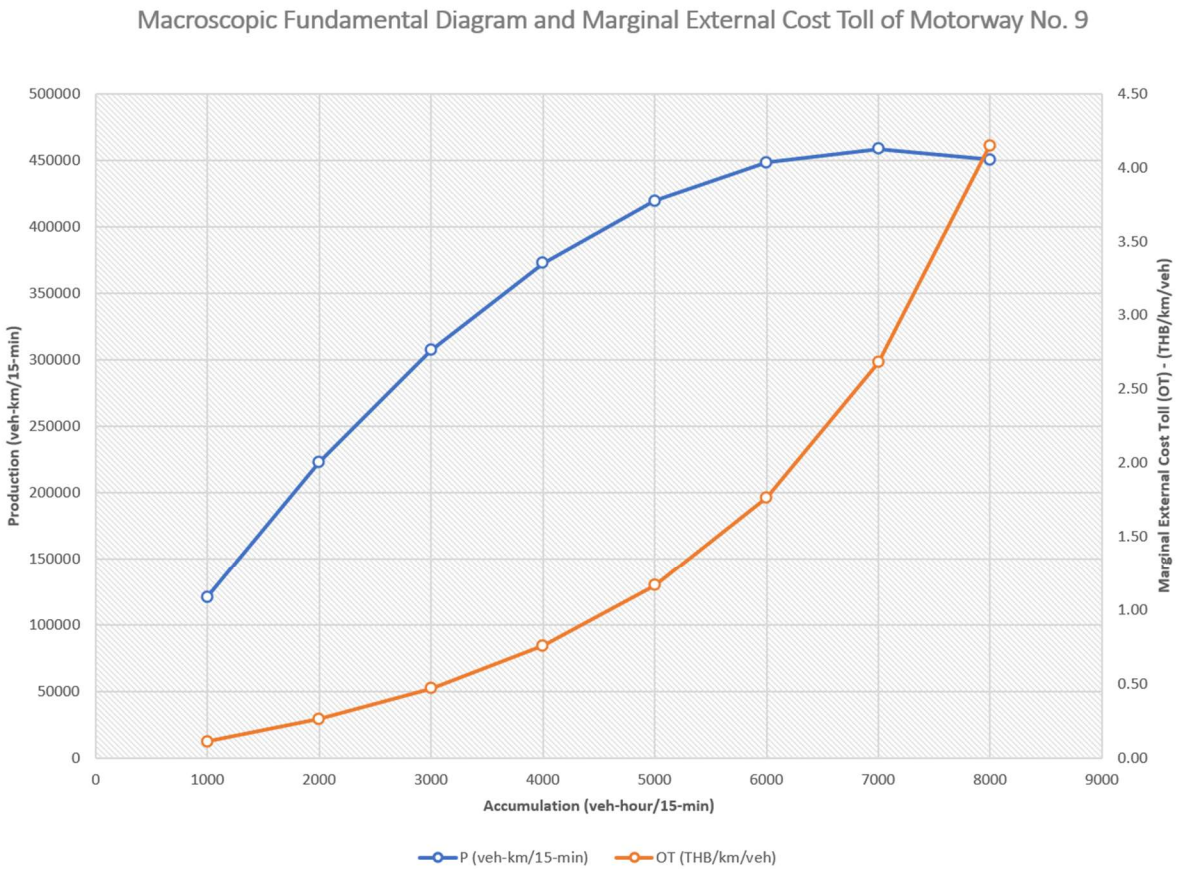
จาก MFD ที่ได้ สามารถคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (AC) และต้นทุนส่วนเพิ่ม (MC) ได้ดังนี้:

$$MEC = \frac{A}{P} - (\frac{A}{P})^2 \frac{dP(A)}{dA} \qquad \text{โดยที่ } \frac{dP(A)}{dA} = -2 \times 0.0092A + 129.9A$$

จากนั้นนำ MEC คูณกับมูลค่าของเวลา (Value of Time: VOT) ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่า: VOT=178.6 บาท/ชั่วโมง/คัน เพื่อแปลงเป็นอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม:

$$Optimal\ Toll\ (OT) = MEC \times VOT$$

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC) กับการสะสมของระบบ (Accumulation) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

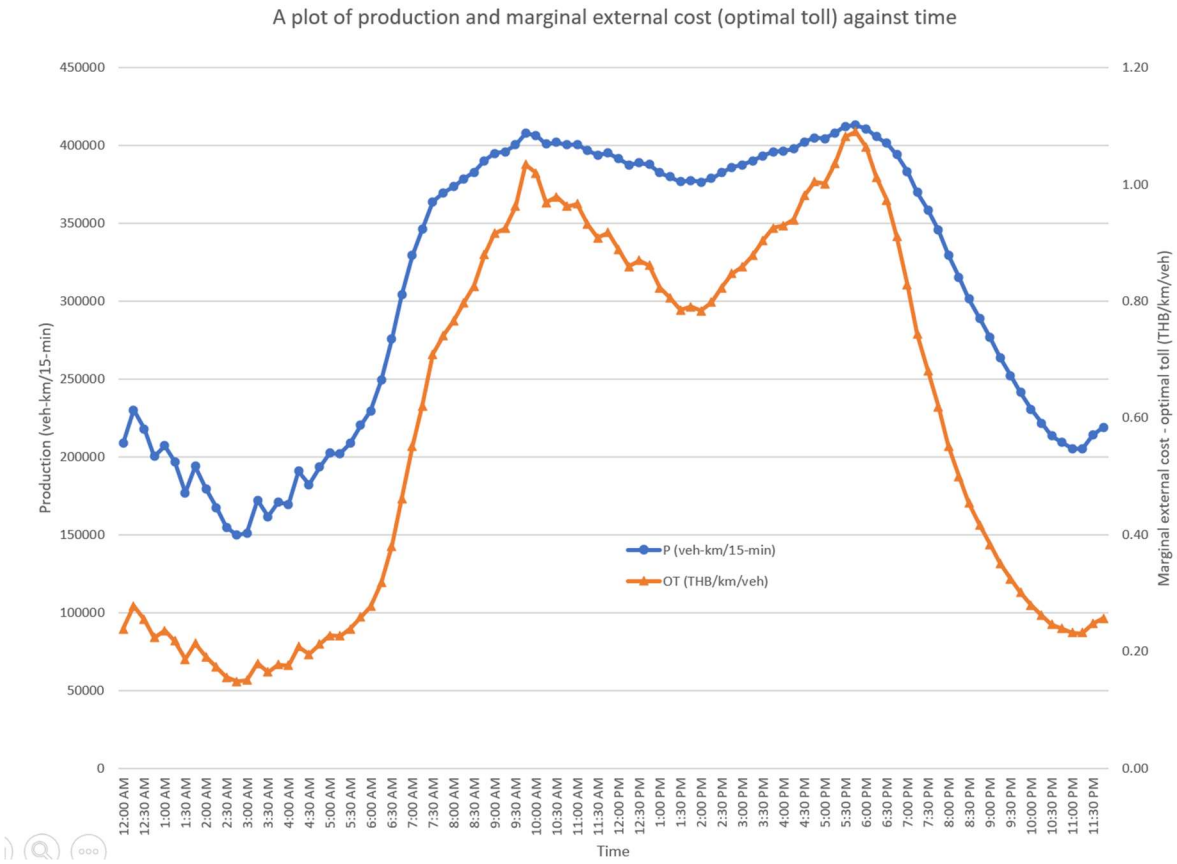


รูปที่ 4.4: แผนภาพ MFD และความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC) กับการสะสมของระบบ (A)

จากรูปที่ 4.4 แกน X แสดงถึงค่าการสะสมของยานพาหนะ (A) ซึ่งวัดเป็นจำนวนยานพาหนะ-ชั่วโมงต่อช่วงเวลา 15 นาที โดยมีค่าตั้งแต่ 1,000 ถึง 8,000 หน่วย ตัวชี้วัดนี้สะท้อนถึงเวลารวมที่ยานพาหนะใช้ในเครือข่ายถนน และสามารถใช้เป็นตัวแทนของระดับความแออัดของการจราจรได้ แกน Y ด้านซ้ายแสดงค่าการผลิต ซึ่งวัดเป็นจำนวนยานพาหนะ-กิโลเมตรต่อช่วงเวลา 15 นาที โดยแสดงถึงระยะทางรวมที่ยานพาหนะทั้งหมดเดินทางภายในเครือข่ายถนน ส่วนแกน Y ด้านขวาแสดงถึงต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม (Optimal Toll: OT) ซึ่งวัดเป็นบาทต่อคันต่อกิโลเมตร (THB/km/veh) โดยแสดงถึงต้นทุนความล่าช้าเพิ่มเติมที่เกิดจากการมีรถเพิ่มขึ้นหนึ่งคันที่เดินทางเพิ่มอีกหนึ่งกิโลเมตร เส้นโค้งสีน้ำเงินแสดงถึงฟังก์ชันการผลิต (P) โดยในช่วงแรกของกราฟ เส้นโค้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าการสะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีรถเข้าสู่ระบบมากขึ้น ผลผลิตรวมของเครือข่ายก็เพิ่มขึ้นตาม อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าการสะสมเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง เส้นโค้งจะเริ่มแบนราบและถึงจุดสูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงผลตอบแทนที่ลดลงจากการเพิ่มจำนวนรถ หลังจากจุดวิกฤตนี้ หากมีการสะสมเพิ่มขึ้นอีกจะทำให้ค่าการผลิตลดลงเนื่องจากเกิดความแออัด โดยรถแต่ละคันเริ่มรบกวนการเคลื่อนที่ของกันและกัน ส่งผลให้

ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง เส้นโค้งสีส้มแสดงถึงต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม (OT) โดยเริ่มต้นจากศูนย์เมื่อค่าการสะสมต่ำ ซึ่งหมายถึงสภาพการจราจรที่คล่องตัวโดยไม่มีผลกระทบภายนอกที่สำคัญ และจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าการสะสมเพิ่มขึ้น สะท้อนถึงต้นทุนความล่าช้าที่เพิ่มขึ้นที่รถแต่ละคันก่อให้แก่ผู้อื่น เส้นโค้ง OT ยังคงเพิ่มขึ้นแม้ว่าค่าการผลิตจะเริ่มคงที่หรือแม้กระทั่งลดลง ซึ่งเน้นให้เห็นถึงความไม่มีประสิทธิภาพและต้นทุนทางสังคมที่เพิ่มขึ้นจากความแออัด

จากข้อมูลจราจรที่ได้ มีการนำค่าการผลิต (P) เฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง และอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลามาพล็อตเป็นกราฟอนุกรมเวลา ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4.5 กราฟนี้ให้ภาพรวมแบบไดนามิกของประสิทธิภาพการจราจรและศักยภาพในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนส่วนเพิ่มโดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาค (MFD)



รูปที่ 4.5: กราฟอนุกรมเวลาของการผลิตของระบบ (P) และอัตราค่าผ่านทางจากต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC)

กราฟนี้แสดงตัวแปรสำคัญสองตัวเทียบกับเวลา ได้แก่:

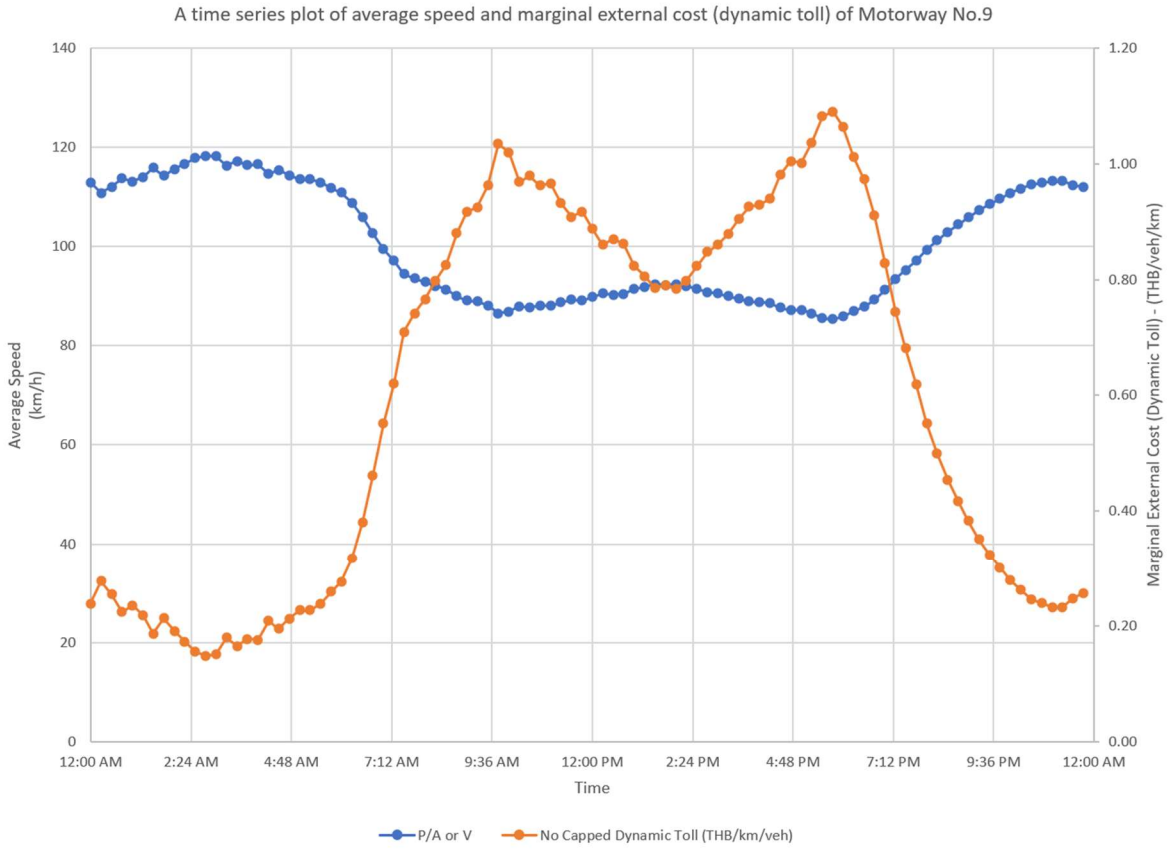
- การผลิต (Production) วัดเป็นจำนวนยานพาหนะ-กิโลเมตรต่อช่วงเวลา 15 นาที ซึ่งสะท้อนถึงระยะทางรวมที่ยานพาหนะทั้งหมดเดินทางในเครือข่ายถนน
- ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม (Marginal External Cost หรือ Optimal Toll: OT) วัดเป็นบาทต่อคันต่อกิโลเมตร (THB/km/veh) ซึ่งแสดงถึงต้นทุนความล่าช้าเพิ่มเติมที่เกิดจากการมีรถเพิ่มขึ้นหนึ่งคันที่เดินทางเพิ่มอีกหนึ่งกิโลเมตร

เส้นสีน้ำเงินในกราฟแสดงถึงค่าการผลิต โดยมีลักษณะเป็นรูปแบบสองยอด (bimodal pattern) อย่างชัดเจน โดยมีจุดสูงสุดสองช่วง ได้แก่:

- ช่วงเช้า ประมาณเวลา 07:00 น. ถึง 10:00 น.
- ช่วงเย็น ประมาณเวลา 16:30 น. ถึง 19:00 น.

ซึ่งตรงกับช่วงเวลาเร่งด่วนของวันธรรมดา แสดงถึงช่วงเวลาที่มีความต้องการเดินทางสูงและการใช้งานเครือข่ายถนนอย่างเข้มข้น ระหว่างสองช่วงนี้ การผลิตลดลงเล็กน้อยในช่วงกลางวัน และลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากช่วงเย็น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการจราจรที่ลดลงในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน เส้นสีส้มในกราฟแสดงถึงต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างระหว่างต้นทุนการเดินทางส่วนเพิ่มและต้นทุนเฉลี่ย ต้นทุนนี้สะท้อนถึงความล่าช้าเพิ่มเติมที่รถแต่ละคันก่อให้แก่ผู้อื่น และเป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดค่าผ่านทางตามความแออัด เส้นต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเส้นการผลิต โดยมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเย็น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแออัด—และต้นทุนทางสังคมของการเดินทาง—สูงที่สุดเมื่อเครือข่ายถนนถูกใช้งานอย่างเข้มข้น กราฟนี้สะท้อนหลักการสำคัญของการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Pricing) คือ อัตราค่าผ่านทางควรสูงที่สุดเมื่อเกิดความแออัดอย่างรุนแรง เพื่อสะท้อนต้นทุนภายนอกและจูงใจให้ผู้ใช้ถนนปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทาง ในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน ทั้งค่าการผลิตและต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มมีค่าต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราค่าผ่านทางควรอยู่ในระดับต่ำหรือไม่จำเป็นต้องเรียกเก็บเลย ในทางกลับกัน ในช่วงเวลาเร่งด่วนที่ต้นทุนภายนอกสูง การเรียกเก็บค่าผ่านทางในระดับสูงจะช่วยควบคุมความต้องการใช้ถนนและเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่าย ผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนแนวคิดว่าการกำหนดค่าผ่านทางโดยอิงจาก MFD สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการกำหนดราคาตามความแออัดในการลดปัญหาความแออัดในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยการจูงใจให้ผู้ใช้ถนนปรับเปลี่ยนเวลาเดินทาง ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่าการผลิตและต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มในกราฟนี้ ยืนยันถึงความถูกต้องของการใช้ตัวชี้วัดที่ได้จาก MFD ในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมและ

เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของจราจร แต่ยังสอดคล้องกับหลักเศรษฐศาสตร์เชิงประสิทธิภาพ โดยการเรียกเก็บค่าผ่านทางในระดับที่สะท้อนต้นทุนทางสังคมที่ผู้ใช้ถนนก่อให้



รูปที่ 4.6: กราฟอนุกรมเวลาของความเร็วเฉลี่ยและอัตราค่าผ่านทางจากต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC)

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ย ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของประสิทธิภาพการไหลของจราจร กับต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม) ตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าสำหรับการกำหนดราคาค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่มโดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาค (MFD) เส้นโค้งสีน้ำเงินแสดงถึงความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ ซึ่งอยู่ในระดับสูงในช่วงเช้ามืด โดยประมาณ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งบ่งชี้ถึงสภาพการจราจรที่คล่องตัว (free-flow conditions) อย่างไรก็ตาม ความเร็วเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างเวลา 07:00 น. ถึง 10:00 น. โดยลดลงต่ำสุดที่ประมาณ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้า หลังจากนั้น ความเร็วจะค่อย ๆ ฟื้นตัวขึ้นมาอยู่ที่ประมาณ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในช่วงบ่ายแก่ ๆ จะมีการลดลงของความเร็วอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งน่าจะสะท้อนถึงช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเย็น ก่อนที่ความเร็วจะ

ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงเที่ยงคืน เส้นโค้งสีส้มแสดงถึงต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม (Optimal Toll) ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับเส้นความเร็วเฉลี่ย โดยเริ่มต้นที่ระดับปานกลางประมาณ 0.20 บาทต่อคันต่อกิโลเมตรในช่วงเที่ยงคืน จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเร่งด่วนตอนเช้า และขึ้นสูงสุดประมาณเก้าโมงเช้าที่ระดับประมาณ 1.10 บาทต่อคันต่อกิโลเมตร ซึ่งสะท้อนถึงระดับความแออัดที่สูงที่สุด โดยที่รถแต่ละคันก่อให้เกิดความล่าช้าอย่างมีนัยสำคัญต่อผู้อื่น หลังจากนั้น อัตราค่าผ่านทางจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและกลับมาสูงอีกครั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และกลับสู่ระดับเริ่มต้นในช่วงเที่ยงคืน ความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระหว่างความเร็วเฉลี่ยกับต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม หรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมนี้ สอดคล้องกับหลักการของการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Pricing) กล่าวคือ เมื่อความเร็วต่ำ (แสดงถึงความแออัดสูง) ต้นทุนภายนอกจะสูง ซึ่งเป็นเหตุผลที่เหมาะสมในการกำหนดค่าผ่านทางในระดับสูงเพื่อยับยั้งการเดินทางเพิ่มเติมและลดความแออัด ในทางกลับกัน เมื่อความเร็วสูงและเครือข่ายถนนยังไม่ถูกใช้งานเต็มที่ ต้นทุนภายนอกจะต่ำ และสามารถลดค่าผ่านทางลงได้

บทที่ ๕

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แนวคิดการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทาง โดยอิงจากต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (Marginal External Cost: MEC) ที่คำนวณจากแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) ซึ่งสร้างขึ้นจากข้อมูลจราจรจริงบนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 9 ด้านตะวันออกของประเทศไทย

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การสร้าง MFD จากข้อมูลจราจรจริง

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลจราจรที่เก็บจากเครื่องตรวจจับแบบเรียลไทม์ในช่วงเวลา 15 นาที สามารถนำมาสร้างแผนภาพ MFD ที่สะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของยานพาหนะ (Accumulation) และการผลิตของระบบ (Production) ได้อย่างแม่นยำ โดย MFD ที่ได้มีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลา ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของระบบจราจรที่มีประสิทธิภาพในช่วง free-flow และประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง congestion

5.1.2. การคำนวณต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มและอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม

จาก MFD ที่ได้ มีการคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost: AC) และต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost: MC) ในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นนำมาหาค่าต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (MEC = MC - AC) และแปลงเป็นอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม (Optimal Toll) โดยใช้มูลค่าของเวลา (Value of Time: VOT) ที่กำหนดไว้ที่ 178.6 บาท/ชั่วโมง/คัน

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า:

- อัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมมีความผันแปรตามช่วงเวลา โดยมีค่าสูงในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (07:00–10:00) และเย็น (16:30–19:00)
- ค่าสูงสุดของอัตราค่าผ่านทางอยู่ที่ประมาณ 1.10 บาท/คัน/กิโลเมตร ในช่วงที่ความเร็วเฉลี่ยต่ำที่สุด
- ในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน อัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมลดลงอย่างมาก หรือใกล้ศูนย์ ซึ่งสะท้อนถึงต้นทุนภายนอกที่ต่ำในช่วงที่ระบบไม่แออัด

5.1.3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยและต้นทุนภายนอก

การวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระหว่างความเร็วเฉลี่ยของระบบกับต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม กล่าวคือ:

- เมื่อความเร็วเฉลี่ยสูง (ระบบคล่องตัว) ⟶ MEC ต่ำ ⟶ ค่าผ่านทางต่ำ
- เมื่อความเร็วเฉลี่ยต่ำ (ระบบแออัด) ⟶ MEC สูง ⟶ ค่าผ่านทางสูง

ความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับหลักเศรษฐศาสตร์ของการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Pricing) ซึ่งเน้นให้ผู้ใช้จ่ายในระดับที่สะท้อนผลกระทบที่ตนเองก่อให้แก่ผู้อื่น

5.1.4. ความเหมาะสมของแนวทาง MFD-based Pricing

แนวทางการกำหนดค่าผ่านทางโดยใช้ MFD มีข้อดีหลายประการ ได้แก่:

- ไม่ต้องใช้ข้อมูลต้นทาง–ปลายทาง (OD data) ซึ่งมักมีต้นทุนสูงและความไม่แน่นอน
- สามารถปรับเปลี่ยนตามเวลาได้ (time-varying) และตอบสนองต่อสภาพจราจรแบบเรียลไทม์
- สามารถขยายผลได้ (scalable) ไปยังทางหลวงหรือเครือข่ายถนนอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน
- สอดคล้องกับหลักการทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการความแออัดอย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

แม้ว่าการศึกษานี้จะได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทาง MFD-based Pricing อย่างชัดเจน แต่ยังมีประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ดังนี้:

5.2.1. การจำลองพฤติกรรมผู้ใช้ถนนภายใต้โครงสร้างราคาที่เปลี่ยนแปลง

ควรมีการพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมผู้ใช้ถนน เช่น agent-based model หรือ dynamic traffic assignment model เพื่อศึกษาว่าผู้ขับขี่จะปรับเปลี่ยนเวลาเดินทาง เส้นทาง หรือโหมดการเดินทางอย่างไรเมื่อเผชิญกับอัตราค่าผ่านทางที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

5.2.2. การบูรณาการกับระบบขนส่งหลายรูปแบบ (Multimodal Integration)

การกำหนดค่าผ่านทางควรพิจารณาผลกระทบต่อระบบขนส่งสาธารณะและการขนส่งสินค้า โดยควรมีการศึกษาว่าโครงสร้างราคาที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเปลี่ยนโหมดการเดินทาง (modal shift) ได้หรือไม่ และในระดับใด

5.2.3. ความยืดหยุ่นของแบบจำลองภายใต้ความไม่แน่นอน

ควรมีการทดสอบแบบจำลองภายใต้สถานการณ์ที่ไม่แน่นอน เช่น:

- อุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ฉุกเฉิน
- สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง
- ความผันผวนของความต้องการเดินทางตามฤดูกาล

เพื่อประเมินความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือของระบบกำหนดราคาที่พัฒนาขึ้น

5.2.4. การพัฒนาอัลกอริธึมและระบบจัดเก็บค่าผ่านทางแบบเรียลไทม์

การนำแนวทางนี้ไปใช้จริงจำเป็นต้องมีระบบจัดเก็บค่าผ่านทางที่สามารถ:

- คำนวณอัตราค่าผ่านทางแบบเรียลไทม์
- แจ้งเตือนผู้ใช้ล่วงหน้า
- เชื่อมต่อกับระบบชำระเงินอัตโนมัติ
- มีอินเทอร์เฟซที่เป็นมิตรกับผู้ใช้

การพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านี้จะเป็นกุญแจสำคัญในการทำให้แนวทาง MFD-based Pricing สามารถนำไปใช้ได้จริงในระดับนโยบาย

เอกสารอ้างอิง

1. Balzer, M. and Leclercq, L., (2022). Congestion Pricing Based on Dynamic Features of the Macroscopic Fundamental Diagram. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2422, pp.12-20.

2. Cassidy, M. J., Jang, K., & Daganzo, C. F. (2011). Macroscopic Fundamental Diagrams for Freeway Networks: Theory and Observation. Transportation Research Record, 2260(1), 8-15. https://doi.org/10.3141/2260-02 (Original work published 2011)

3. Department of Highways (DOH) (2023). Handbook of Value of Time Calculation for Highway Planning.

4. Geroliminis, N., and Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. Transportation Research Part B: Methodological, 42(9), 759–770.

5. Hearn, D. W., and Ramana, M. V. (1998). Solving congestion toll pricing models. In P. Marcotte & S. Nguyen (Eds.), Equilibrium and Advanced Transportation Modelling (pp. 109–124). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5757-9_6

6. Kaddoura, I. (2015). Marginal congestion cost pricing in a multi-agent simulation: Investigation of the Greater Berlin Area. Journal of Transport Economics and Policy, 49(4), 560–578. https://www.jstor.org/stable/jtranseconpoli.49.4.0560

7. Laval, J.A., Ding, Z., and Lee, G. (2024). Macroscopic Fundamental Diagram Estimation using Loop-Detector Data. STRIDE Final Report.

8. Liu, Y., Li, X. and Ramezani, M., (2023). Congestion Pricing in Multimodal Networks: An Application of Deep Reinforcement Learning. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 30, pp.177-190.

9. Pigou, A. C. (1920). The economics of welfare. London: Macmillan.

10. Saberi, M., Mahmassani, H.S., Hou, T., and Zockaie, A. (2014). Estimating Network Fundamental Diagram Using Three-Dimensional Vehicle Trajectories: Extending Edie's Definitions of Traffic Flow Variables to Networks. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2422, 12-20.

11. Small, K. A., and Verhoef, E. T. (2007). The economics of urban transportation. Routledge.

12. Suwanno, P., Kasemsri, R., Duan, K. and Fukuda, A., (2021). Application of Macroscopic Fundamental Diagram under Flooding Situation to Traffic Management Measures. Sustainability, [online] 13(20), p.11227. Available at: https://doi.org/10.3390/su132011227

13. Suwanno (2021). Study on Evaluation of Traffic Management Measures Using Macroscopic Fundamental Diagram under Flooding Situation. Nihon University Thesis

14. Vickrey, W. (1969). Congestion theory and transport investment. American Economic Review, 59(2), 251–260.

15. Zheng, N., Waraich, R.A., Geroliminis, N. and Axhausen, K.W., 2011. A Dynamic Cordon Pricing Scheme Combining the Macroscopic Fundamental Diagram and an Agent-Based Traffic Model. Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung, [online] Available at: https://doi.org/10.3929/ethz-a-006567757

16. Zhou, Y. (2013). The Macroscopic Fundamental Diagram in Urban Network: Analytical Theory and Simulation. Georgia Institute of Technology Thesis.

รายงานฉบับที่ : วพ. ๓๒๙ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

ผู้เขียน : นายพลเทพ เลิศวรวนิช

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มโดยใช้แผนภาพพื้นฐานมหภาคเพื่อการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามระยะทาง

บทคัดย่อ : การศึกษานี้ได้พัฒนาแนวทางการกำหนดอัตราค่าผ่านทางตามต้นทุนส่วนเพิ่ม (Marginal Cost Pricing) โดยอิงจากแผนภาพพื้นฐานมหภาค (Macroscopic Fundamental Diagram: MFD) สำหรับการจัดเก็บค่าผ่านทางตามระยะทางบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ “ทำให้ต้นทุนภายนอกกลายเป็นต้นทุนภายใน” (internalize congestion externalities) ผ่านการปรับอัตราค่าผ่านทางแบบไดนามิกตามสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ โดยใช้ข้อมูลจราจรที่เก็บจากหลายตำแหน่งของเครื่องตรวจนับตามแนวทางหลวง การศึกษานี้ได้สร้าง MFD เชิงประจักษ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของยานพาหนะ (accumulation) และการผลิตของระบบ (production) ซึ่ง MFD นี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (average cost) และต้นทุนส่วนเพิ่ม (marginal cost) ต่อกิโลเมตร และนำไปสู่การคำนวณอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสมในรูปของต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่ม (marginal external cost) ที่เกิดจากยานพาหนะแต่ละคันที่เพิ่มเข้าสู่ระบบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มหรืออัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม จะมีค่าสูงในช่วงที่มีความแออัดสูง เช่น ช่วงเวลาเร่งด่วนในตอนเช้าและตอนเย็น ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว ยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นแต่ละคันจะก่อให้เกิดความล่าช้าอย่างมีนัยสำคัญต่อผู้อื่น จึงมีเหตุผลในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางที่สูงขึ้นเพื่อควบคุมความต้องการใช้ถนน ในทางกลับกัน ในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน ต้นทุนภายนอกส่วนเพิ่มจะอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าอัตราค่าผ่านทางสามารถลดลงหรือยกเว้นได้ กลยุทธ์การกำหนดราคาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นนี้ สอดคล้องกับหลักการของการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่ม และส่งเสริมการใช้โครงสร้างพื้นฐานทางถนนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กราฟอนุกรมเวลาที่แสดงค่าการผลิต ความเร็วเฉลี่ย และอัตราค่าผ่านทางที่เหมาะสม ช่วยให้เห็นภาพพลวัตของการจราจรและศักยภาพในการกำหนดราคาในแต่ละช่วงเวลาอย่างชัดเจน ผลการศึกษายืนยันว่า การกำหนดค่าผ่านทางโดยอิงจาก MFD สามารถตอบสนองต่อสภาพการจราจรแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริงและขยายผลได้ในการบริหารจัดการความแออัด การใช้ข้อมูลภาคสนามจริงยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและความเกี่ยวข้องเชิงนโยบายของผลการศึกษา การศึกษานี้สรุปว่าแนวทางการกำหนดราคาตามต้นทุนส่วนเพิ่มโดยใช้ MFD เป็นกรอบแนวคิดที่สามารถนำมาใช้ออกแบบนโยบายค่าผ่านทางที่มีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายจราจรได้อย่างเหมาะสม สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรให้ความสำคัญกับการพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของผู้ใช้ถนน การบูรณาการกับระบบขนส่งหลายรูปแบบ และการนำไปใช้จริงในระบบจัดเก็บค่าผ่านทางแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแนวทางนี้ให้มากยิ่งขึ้น