การประมาณค่าความจุของช่วงถนนโดยวิธี Indirect Empirical Methods
Roadway Capacity Estimation by Indirect Empirical Methods

วุฒิไกร ไชยปัญหา[1], จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร[2], ลัดดา ตันวาณิชกุล[3]
Wuttikrai Chaipanha[1], Jumrus Pitaksringkarn[2], Ladda Tanwanichkul[3]

Received: 17 July 2017; Accepted: 2 October 2017

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทบทวนแนวทางในการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนน ซึ่งเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการออกแบบและวางแผนด้านการขนส่งและจราจร โดยเนื้อหาหลักของบทความนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการวิเคราะห์ ตัวอย่างผลการศึกษา ข้อดีและข้อจำกัดของการวิเคราะห์ความจุด้วยวิธี Indirect Empirical Method ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถลดข้อจำกัดในการสำรวจข้อมูลในภาคสนาม โดยวิธีการนี้ประกอบด้วย 2 แนวทาง คือ (1) การคำนวณค่าความจุตามคู่มือ ซึ่ง HCM เป็นคู่มือที่ได้รับการยอมรับสูงสุดและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แต่เนื่องจากเป็นคู่มือที่ถูกพัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกาจึงอาจจะไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรงในพื้นที่ที่มีเงื่อนไขของสภาพการจราจรที่มีความแตกต่างออกไป และ (2) การประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค วิธีการนี้มีข้อจำกัดในการนำเข้าข้อมูลและตัวแปรที่มีจำนวนมากแต่มีข้อดีที่สามารถจำลองสถานการณ์ เงื่อนไข และพฤติกรรมของผู้ขับขี่ยวดยานได้อย่างละเอียดทำให้ผลการประมาณค่าความจุมีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น โดยการประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคถือได้ว่าเป็นวิธีการหนึ่งในการพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนและทางหลวงในประเทศไทยที่ยังคงมีการศึกษาค่อนข้างน้อยจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งในการทำการวิจัยในอนาคต

คำสำคัญ : ความจุของช่วงถนน แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค HCM

Abstract

This paper aims to study and review the methodology for analyzing roadway capacity. This is an important principle in the design and planning of transportation and traffic facilities. The main contents of this article offer analytical procedures, sample study results, and considers the advantages and limitations of the Indirect Empirical Method, which is a method that can reduce the limitations of field surveys. This method consists of two approaches: (1) capacity calculation according to the manual, for which HCM is the most widely used; however, since this is a guide developed in the United States, it may not be applicable directly in areas where traffic conditions are different, and (2) capacity estimation using the traffic micro-simulation model. The latter approach has limitations on the input data and variables, but has the advantage of accurately simulating the conditions and driver behaviors, thus making the estimation of capacity more reasonable. By capacity estimation using the traffic micro-simulation model, it is possible to develop a roadway and highway capacity analysis in Thailand. There are still relatively few existing studies of this subject area, which makes the topic particularly interesting for research in the future.

Keywords : Roadway Capacity, Traffic Micro-simulation model, HCM

---

[1] *นักศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40000*

[2] *อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพ 10520*

[3] *รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40000*

[1] *Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000*

[2] *Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 10520*

[3] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000*

* *Corresponding author: Wuttikrai Chaipanha, Email : w.chaipanha@gmail.com*

บทนำ

การวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกจราจรที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบส่วนประกอบสิ่งอำนวยความสะดวกจราจรที่เกี่ยวข้อง นำไปสู่การตัดสินใจและการวางแผนปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงข่ายถนนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

โดยวิธีการในการประมาณค่าความจุของช่วงถนนในปัจจุบันสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ (1) Direct-Empirical Method ซึ่งวิธีการประมาณค่าความจุของช่วงถนนโดยตรงที่พิจารณาจากข้อมูลการสำรวจตามสภาพการจราจรจริง และ (2) วิธีการประมาณค่าความจุแบบ Indirect-Empirical Method ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าความจุของช่วงถนนทางอ้อมจากการใช้แนวทางตามคู่มือการวิเคราะห์ความจุและการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมาณค่าความจุ

การประมาณค่าความจุของช่วงถนนด้วยวิธี Indirect Empirical Method ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประมาณการค่าความจุของช่วงถนนที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากการสำรวจและวิเคราะห์ความจุโดยตรงทำได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติและไม่บ่อยครั้งที่ช่วงถนนหรือทางหลวงนอกเมืองจะให้บริการจราจรในสภาพใกล้เต็มความจุ โดยในบทความนี้ได้ทำการทบทวนวิธีการและแนวทางในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ความจุของถนนด้วยวิธี Indirect Empirical ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนและทางหลวงในประเทศไทยต่อไป

วิธีการประมาณค่าความจุของช่วงถนน

Minderhoud et al.,[1] กล่าวว่า วิธีการประมาณค่าความจุของช่วงถนนแบ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ (1) Direct-Empirical Methodและ (2) Indirect-Empirical Method รายละเอียดดัง Figure 1

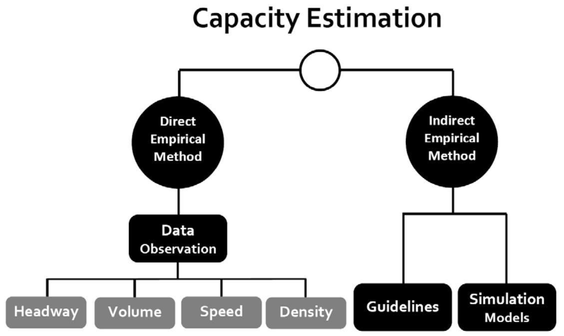

Figure 1 Roadway capacity-estimation methods

การประมาณค่าความจุแบบ Direct Empirical

การประมาณค่าความจุแบบ Direct Empirical เป็นการประมาณค่าความจุโดยตรงที่พิจารณาจากข้อมูลการสำรวจตามสภาพการจราจรจริง โดย 2 ข้อมูลสำคัญที่มีความจำเป็นในการประมาณค่าความจุของช่วงถนน คือ ปริมาณจราจรและช่วงเวลาห่าง (Headway) อย่างไรก็ตามอาจมีการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการจราจรเพิ่มเติม เช่น ความหนาแน่นและความเร็วเฉลี่ย ซึ่งจะสามารถช่วยให้ประมาณค่าความจุได้ดียิ่งขึ้น โดยข้อมูลปริมาณจราจรและช่วงเวลาห่างถือเป็นข้อมูลหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ความจุในวิธีนี้ ส่วนข้อมูลความเร็วและความหนาแน่นอาจจำเป็นสำหรับบางวิธี การสำรวจข้อมูลต้องดำเนินการในช่วงที่การจราจรไม่ติดขัดหรือเกินความจุของช่วงถนนนานเกินไป ตัวอย่างวิธีการประมาณค่าความจุแบบ Direct Empirical เช่น

1) ประมาณค่าความจุด้วย Headway (Estimation with Headway) แบบจำลอง Headway ใช้พื้นฐานตามทฤษฎีที่ระดับความจุของช่วงถนน ซึ่งผู้ขับขี่ยานพาหนะทุกคนจะถูกจำกัดด้วย Headway แบบจำลองนี้สามารถประยุกต์ใช้เฉพาะช่องจราจรเดียว ในกรณีของหลายช่องจราจรจะถูกแยกพิจารณารายช่องจราจร สองแบบจำลอง Headway ที่เป็นที่รู้จักอย่างดีและใช้อย่างแพร่หลาย คือ Branston's Generalized Queueing Model และ Buckley's Semi-Poisson Model ซึ่งทั้งสองวิธีการใช้หลักการพื้นฐานของ Poisson แต่แตกต่างในสมมติฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมการขับขี่เล็กน้อย การประมาณค่าความจุด้วย Headway ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึง (3)

$$h_m = \sum \frac{h_p}{n} \quad \text{(วินาที/คัน)} \qquad (1)$$

$$q = \frac{n}{T} = \frac{1}{h_m} \quad \text{(คัน/วินาที)} \qquad (2)$$

$$q = \frac{3600}{h_m} \quad \text{(คัน/ชั่วโมง)} \qquad (3)$$

โดยที่

h_m = เวลาห่างเฉลี่ย (Mean Headway) (วินาที/คัน)

h_p = เวลาห่าง (Headway) ของยวดยาน p ถึงยวดยานคันก่อนหน้า (วินาที/คัน)

q = ความหนาแน่น (วินาที/คัน)

n = จำนวนรวมของยวดยานที่ผ่านจุดที่ทำการสำรวจในช่วงเวลา T (วินาที/คัน)

2) ประมาณค่าความจุด้วยปริมาณจราจร (Estimation with Traffic Volumes) วิธีการประมาณค่าความจุด้วย

ปริมาณจราจรเพียงอย่างเดียว สามารถเลือกใช้สองค่าปริมาณจราจรสูงสุด ได้แก่ (1) ปริมาณจราจรสูงสุดการสำรวจ (Observed Extreme Value) เป็นการประมาณค่าความจุของช่วงถนนโดยใช้ค่าปริมาณจราจรสูงสุดที่รู้ค่าในช่วงที่สำรวจ ตัวอย่างวิธีการที่เป็นที่นิยมเช่น Bimodal Model และ Maxima Methods เป็นต้น และ (2) ปริมาณจราจรสูงสุดจากการคาดการณ์ (Expected Extreme Value) วิธีการนี้ใช้อัตราการไหลสูงสุดที่สำรวจได้ในช่วงเวลาที่กำหนดเพื่อพยากรณ์ค่าความจุที่สูงกว่าด้วยหลักการทางสถิติตัวอย่างวิธีการที่เป็นที่นิยม เช่น Direct Probability และ Asymptotic Method เป็นต้น

3) ประมาณค่าความจุด้วยปริมาณจราจรและความเร็ว (Estimation with Traffic Volumes and Speed) วิธีการประมาณค่าความจุโดยใช้ทั้งข้อมูลปริมาณจราจรและความเร็วในการวิเคราะห์สภาพของการจราจร ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความชัดเจนและมีประสิทธิภาพในการหาค่าความจุ โดยค่าความจุจะได้เป็นความจุ ณ จุดที่มีการสำรวจ วิธีการที่ใช้คือ Product Limit Method

4) ประมาณค่าความจุด้วยปริมาณจราจร ความเร็วและความจุ (Estimation with Traffic Volumes, Speed and Densities) แบ่งได้เป็น 2 วิธี โดยความแตกต่างสำคัญของทั้งสองวิธี คือ วิธี Dynamics On-Line Method สำหรับประมาณค่าความจุภายใต้สภาพจริง ส่วนวิธี Static Long Term (Off-Line) Approach ใช้ Fundamental Diagram ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณจราจร (q) ความเร็วเฉลี่ย (u) และความหนาแน่น (k) ซึ่งอาจจะสามารถใช้เพียงสองตัวแปรในการสร้าง Fundamental Diagram ได้เช่นกัน โดยความจุสูงสุดอยู่ในจุดที่ความหนาแน่นมีค่าวิกฤต k_c ตามสมการที่ (4)

$$k = \frac{u}{q} \qquad (4)$$

ตัวอย่าง Fundamental Diagram ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณจราจร ความเร็วเฉลี่ย และความหนาแน่น ที่สามารถใช้ในการประมาณค่าความจุ เช่น Green shields Model, Greenberg Model และUnderwood เป็นต้น

การประมาณค่าความจุแบบ Indirect Empirical

การประมาณค่าความจุแบบ Indirect-Empirical Method เป็นวิธีการประมาณค่าความจุของช่วงถนนทางอ้อม โดยสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ การใช้แนวทางจากคู่มือการวิเคราะห์ความจุ (ซึ่งในปัจจุบัน HCM เป็นคู่มือที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด) และการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจร (Simulation Models) ที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมาณค่าความจุ รายละเอียดทั้งสองวิธีการซึ่งเป็นใจความสำคัญของบทความนี้จะแสดงในหัวข้อถัดไป

การประมาณค่าความจุของช่วงถนนด้วยวิธี Highway Capacity Manual (HCM)

U.S. Highway Capacity Manual (HCM) นับเป็นคู่มือฉบับแรกที่ริเริ่มเสนอแนวคิดเชิงปริมาณในการประมาณค่าความจุและระดับการให้บริการสำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกการจราจร จนกระทั่งที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยถูกพัฒนาขึ้นโดย TRB Committee on Highway Capacity and Quality of Service และเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 และพัฒนาปรับปรุงเรื่อยมาตั้งแต่ปีค.ศ.1965, 1985, 2000 และ 2010

ซึ่งหากจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความจุใน HCM2010 เฉพาะรูปแบบการเดินทางของยานพาหนะ (Automobile) สำหรับการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนหรือสิ่งอำนวยความสะดวกจราจรสิ่งอำนวยความสะดวกการจราจรแบบต่อเนื่อง (Uninterrupted-Flow Facilities) ซึ่งสิ่งอำนวยความสะดวกประเภทนี้จะไม่เป็นสาเหตุให้การจราจรเกิดความล่าช้าหรือหยุดชะงักแก่กระแสจราจร ได้แก่ ทางด่วน (Freeway) ทางหลวงหลายช่องจราจร (Multilane Highway) และทางหลวงสองช่องจราจร (Two-lane Highway) ซึ่งในช่วงถนนจะต้องไม่มีสัญญาณไฟจราจร ป้ายหยุดบริเวณทางแยก และวงเวียนที่ทำให้กระแสจราจรหยุดชะงักต้องมีช่วงระยะห่างอย่างน้อย 2 ไมล์ มีวิธีการวิเคราะห์ความจุสำหรับช่วงถนนหรือทางหลวงหลายช่องจราจรและทางหลวงสองช่องจราจรโดยสรุป ดังนี้

การประมาณค่าความจุทางหลวงหลายช่องจราจร (Multilane Highway)

Transport Research Board (TRB)[2] การวิเคราะห์ความจุและระดับการให้บริการของถนนหลายช่องจราจร (Multilane Highway) ซึ่งเป็นช่วงถนนที่ไม่มีการรบกวนการไหลของกระแสจราจร (Uninterrupted-flow) โดยทั่วไปพิจารณาบนช่วงถนนหลายช่องจราจรที่มีช่วงห่างระหว่างทางแยกสัญญาณไฟจราจรตั้งแต่ 2 ไมล์ ขึ้นไป กรณีที่สัญญาณจราจรใกล้กันมากจะวิเคราะห์ในลักษณะที่เป็นถนนในเขตเมือง (Urban Street) มีแนวทางในการวิเคราะห์ความจุและระดับการให้บริการ[3] (Figure 2) ดังนี้

1) นำเข้า/เตรียมข้อมูลที่จำเป็น (Input Data) เช่น ความเร็วในการไหลอิสระ จำนวนช่องและความกว้างของช่องจราจร ระยะปลอดภัย ประเภทของเกาะกลางถนน สัดส่วนของ

ยวดยานขนาดใหญ่ และ PHF เป็นต้น

2) ประมาณค่าความเร็วในการไหลอิสระ (Estimate Free Flow Speed, FFS) ของช่วงถนน ในสภาพจริง ซึ่งสามารถสำรวจได้โดยตรงหรือจากการประมาณจากขีดจำกัดความเร็วบวกด้วย 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) เลือกค่าความจุในสภาพในอุดมคติ (Select Base Capacity) สำหรับทางหลวงหลายช่องจราจรจาก Speed-Flow Curve ของ HCM2010 (ในหน่วยของ pc/hr/ln) ซึ่งสามารถใช้ค่าความจุตาม Table 1 โดยไม่ความจำเป็นต้องทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ (Interpolate)

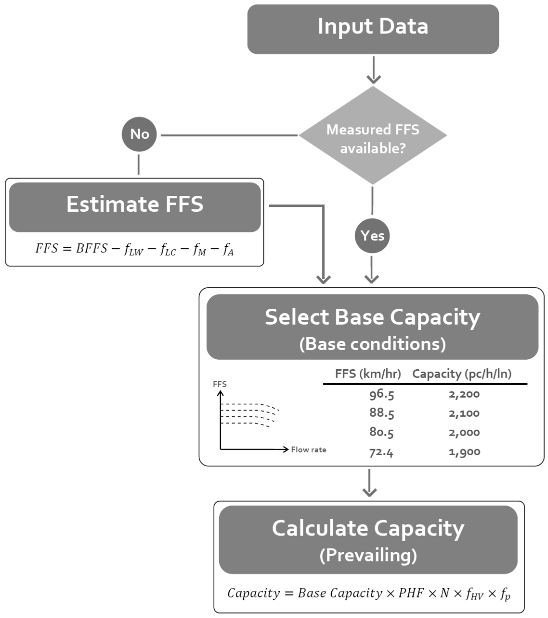

Figure 2 Methodology for Estimating the Capacity of Multilane Highway

Table 1 Relationship between Free-Flow Speed and Capacity on Multilane Highway[4]

ความเร็วในการไหลอิสระ (km/hr)	ความจุ (pc/hr/ln)
96.5	2,200
88.5	2,100
80.5	2,000
72.4	1,900

*ตารางนี้ได้ถูกแปลงหน่วยจาก HCM2010 ต้นฉบับที่ใช้ใน U.S. ให้อยู่ในระบบ SI unit

4) คำนวณค่าความจุ (Calculate Capacity) ในสภาพจริงโดยการปรับแก้เนื่องจาก Peak Hour Factor (PHF) จำนวนช่องจราจร ยวดยานขนาดใหญ่ และความคุ้นเคยเส้นทางของผู้ขับขี่ โดยใช้สมการที่ (5) ในการปรับแก้

$$Capacity = BaseCap \times PHF \times N \times f_{HV} \times f_p \quad (5)$$

โดยที่

$Capacity$ = ความจุในสภาพจริง (veh/hr/ln)

$BaseCap$ = ความจุสภาพในอุดมคติ (pc/hr/ln)

PHF = Peak Hour Factor

N = จำนวนช่องจราจร

f_{HV} = ค่าปรับแก้เนื่องจากยวดยานขนาดใหญ่*

f_p = ค่าปรับแก้เนื่องจากผู้ขับขี่*

*ค่าปรับแก้แสดงในคู่มือ Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010)

การประมาณค่าความจุของทางหลวง 2 ช่องจราจร (Two-lane Highway)

TRB[2] ได้แสดงรายละเอียดในการวิเคราะห์ความจุและระดับการให้บริการของทางหลวงสองช่องจราจรซึ่งเป็นทางหลวงที่มีหนึ่งช่องจราจรต่อทิศทาง การแซงถูกจำกัดด้วยระยะห่างหรือช่องว่างจากกระแสจราจรในทิศตรงข้ามและระยะการมองเห็นที่เพียงพอสำหรับผู้ขับขี่ที่จะมองเห็นได้อย่างปลอดภัยในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านปริมาณจราจรและลักษณะทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้โอกาสในการแซงลดลง

โดยการวิเคราะห์นี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการไม่มีการรบกวนการไหลของกระแสจราจร (Uninterrupted Flow) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีอุปกรณ์ในการควบคุมการจราจรและสัญญาณไฟจราจรโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2.0- 3.0 ไมล์ จากสัญญาณไฟจราจรที่ใกล้ที่สุดถ้าระยะห่างจากทางแยกสัญญาณไฟจราจรน้อยกว่า 2.0 ไมล์ จะต้องวิเคราะห์ให้เป็นถนนในเมือง โดยความจุของทางหลวงสองช่องจราจรภายใต้เงื่อนไขพื้นฐานหรือสภาพในอุดมคติ เท่ากับ 1,700 pc/hr/dir และสูงสุดที่ 3,200 pc/hr ขั้นตอนการวิเคราะห์ความจุของทางหลวงสองช่องจราจร (Figure 3) ดังนี้

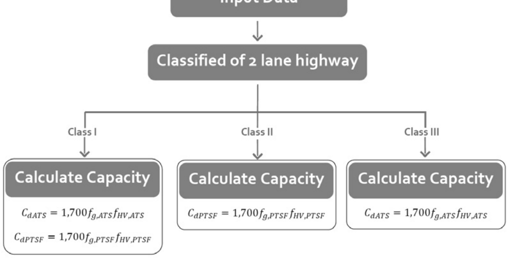

Figure 3 Methodology for Estimating the Capacity of Two-lane highway

1) นำเข้า/เตรียมข้อมูล (Input Data) ที่จำเป็น เช่น ความกว้างของช่องจราจร ความกว้างของไหล่ทาง และสัดส่วนของยวดยานขนาดใหญ่ เป็นต้น

2) แบ่งชั้นของทางหลวงสองช่องจราจร (Classified of Two-lane Highway) โดยกำหนดตามลักษณะหน้าที่ของแต่ละชั้น (Class) สำหรับถนนสายประธานหรือถนนสายหลักจะถูกพิจารณาเป็น Class I ในขณะที่ถนนสายรองและถนนสายท้องถิ่นจะถูกพิจารณาเป็น Class II หรือ Class III

3) คำนวณค่าความจุ (Calculate Capacity) ในสภาพจริงโดยทำการปรับแก้โดยใช้สมการที่ (6) หรือสมการที่ (7) (หรือทั้งสองสมการ) สำหรับทางหลวงสองช่องจราจร Class I ต้องคำนวณทั้งสองสมการโดยเลือกใช้ค่าที่ต่ำกว่าเป็นค่าความจุของทางหลวงสองช่องจราจร Class I สำหรับทางหลวงสองช่องจราจร Class II คำนวณเฉพาะสมการ PTSF-Based และสำหรับทางหลวงสองช่องจราจร Class III คำนวณเฉพาะสมการ ATS-Based

$$C_{dATS} = 1{,}700 \times f_{g,ATS} \times f_{H\ ,ATS} \tag{6}$$

$$C_{dPTSF} = 1{,}700 \times f_{g,PTSF} \times f_{H\ ,PTSF} \tag{7}$$

โดยที่

C_{dATS} = ความจุในทิศทางที่ทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง (ATS) (pc/hr)

C_{dPTSF} = ความจุในทิศทางที่ทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับร้อยละของเวลาที่ใช้ในการขับตาม (PTSF) (pc/hr)

f_g = ค่าปรับแก้เนื่องจากความลาดชันสำหรับ ATS และ PTSF*

f_H = ค่าปรับแก้เนื่องจากยวดยานขนาดใหญ่สำหรับ ATS และ PTSF*

*ค่าปรับแก้แสดงในคู่มือ Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010)

ในการประเมินความจุ เมื่อการกระจายตัวของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทางไม่ใช่ 50/50 (ในสภาพภูมิประเทศแบบราบและลูกเนิน) ความจุในสองทิศทางจะมีความแตกต่างกัน ในกรณีที่ความจุสองทิศทางรวมกันเกินกว่า 3,200 pc/hr จะกำหนดความจุพื้นฐานไว้ที่ 1,700 pc/hr ในทิศทางที่มีปริมาณจราจรสูงกว่า และค่าความจุในทิศทางตรงข้ามจะสามารถหาได้โดยการใช้สัดส่วนของปริมาณจราจร ซึ่งสูงสุดไม่เกิน 1,500 pc/hr

การประมาณค่าความจุของช่วงถนนด้วยแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

ถึงแม้ว่า HCM จะเป็นคู่มือที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนในปัจจุบัน แต่เนื่องจากเป็นแนวทางที่ถูกพัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกา ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์โดยตรงได้ในหลายๆ ประเทศ จากความแตกต่างของสภาพการจราจรของแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชียซึ่งมีรูปแบบและลักษณะการจราจรที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวจึงทำให้ผลการประเมินความจุของช่วงถนนที่ได้จาก HCM มีความคลาดเคลื่อนและขาดความสมเหตุสมผล โดยสาเหตุหลายประการที่ทำให้ HCM ไม่สามารถประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง เช่น สัดส่วนของรถจักรยานยนต์และยวดยานที่ขับเคลื่อนโดยไม่ใช้เครื่องยนต์ที่สูง (Unmotorised Vehicles) Tiwari et al.,[5] รถจักรยานยนต์ไม่ได้ถูกรวมเข้าไปในการประมาณค่าความจุหรือในขั้นตอนในการวิเคราะห์ของ HCM ใดๆทั้งสิ้น เนื่องจากในสหรัฐอเมริกามีสัดส่วนการจดทะเบียนรถจักรยานยนต์น้อยมาก) ประเภทของยวดยานที่หลากหลาย (Heterogonous Traffic) พฤติกรรมในการขับขี่และความระมัดระวังของผู้ขับขี่ของแต่ละท้องถิ่น กฎจราจร สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ลักษณะทางกายภาพของถนน เขตทางและปฏิสัมพันธ์กับพื้นที่ข้างทาง ทางเชื่อม สภาพผิวจราจร และสิ่งอำนวยความสะดวกจราจรอื่นๆ เป็นต้น

Central Road Research Institute[6] กล่าวว่า ในบางประเทศใช้วิธีการดัดแปลงบางส่วนจาก HCM เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการจราจรของแต่ละประเทศ อีกทั้งหลายประเทศได้มีความพยายามในการพัฒนาคู่มือความจุของทางหลวงสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความจุของทางหลวงในประเทศของตนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสาเหตุข้างต้นและทำให้ผลการวิเคราะห์สามารถสะท้อนถึงพฤติกรรมการขับขี่ในท้องถิ่น ตัวอย่างเช่น Indian Highway Capacity Manual(Indo-HCM) ของประเทศอินเดีย, Swedish Capacity Manual ของประเทศสวีเดน Indonesian Highway Capacity Manual (I-HCM) ของประเทศอินโดนีเซีย Korea Capacity Manual (KHCM) ของประเทศเกาหลีใต้ German Highway Capacity Manual (HBS) ของประเทศเยรมันนี และChina Highway Capacity (CHCM) ของประเทศจีน เป็นต้น

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นอีกแนวทางหนึ่งในวิธีการการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนแบบ Indirect Empirical ซึ่งนิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคสามารถจำลองพฤติกรรมของผู้ขับขี่ยวดยานแต่ละคันได้ ซึ่งจะสามารถสะท้อนลักษณะเฉพาะของการจราจรในสภาพจริงในแต่ละ

พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคจะดำเนินการโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคมีขั้นตอนโดยสรุป (Figure 4) ดังนี้

1) สำรวจและรวบรวมข้อมูล (Data Collection) สำหรับการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ได้แก่ ข้อมูลกายภาพช่วงถนน ข้อมูลความต้องการในการเดินทาง ข้อมูลการควบคุมการจราจร และข้อมูลสำหรับปรับเทียบแบบจำลอง

2) พัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Micro-simulation Model Development) พัฒนาแบบจำลองฐาน (Base Model) และทำการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibrate) และตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง (Validate) เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับสภาพจริงการสำรวจในสนาม ตามเกณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับ เช่น DMRB, Wisconsin DOT, Caltrans และ Austroad เป็นต้น จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

3) กำหนดตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความจุ (Define Simulation Factors/Scenarios) กำหนดตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความจุหรือออกแบบสถานการณ์จำลองต่าง ๆ

4) ประมวลผลแบบจำลอง (Simulation Runs) ให้ได้ผลลัพธ์ของความเร็วสำหรับระดับปริมาณจราจรที่แตกต่างกันซึ่งถูกกำหนดตามสถานการณ์ในการจำลองสภาพจราจรหลาย ๆ สถานการณ์เพื่อประมาณค่าความจุสูงสุดตามเงื่อนไขต่าง ๆ

5) แสดงผลการวิเคราะห์ (Estimate Output) โดยสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-ปริมาณจราจร (Speed-Flow Curve)

6) ประมาณค่าความจุ (Estimate of Capacity) จากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค

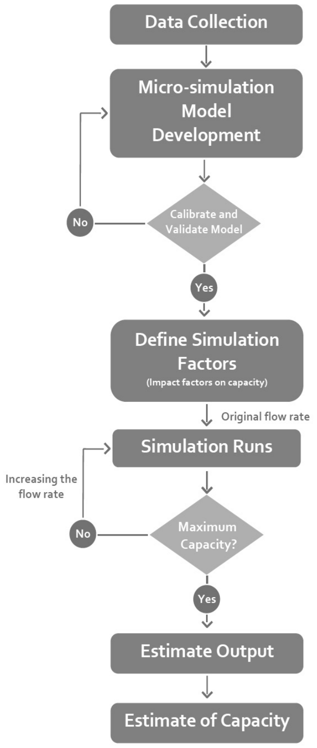

Figure 4 Methodology for roadway capacity estimation by using traffic micro-simulation model

ตัวอย่างการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคในการประมาณค่าความจุของช่วงถนน

ลัดดา ตันวาณิชกุล และคณะ[7] ประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคVISSIM ในการวิเคราะห์ความจุของถนน 6, 4 และ 2 ช่องจราจร โดยพิจารณาถึงจำนวนของทางเชื่อมมีผลอย่างมากต่อความจุของถนน เมื่อทางเชื่อมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความจุของถนนลดลงแบบจำลองตามระดับความถี่ทางเชื่อม ดังแสดงใน Figure 5

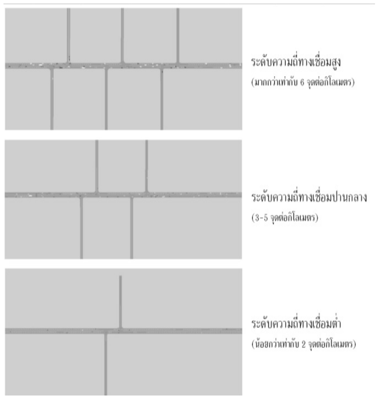

Figure 5 Evaluation of number of access points influencing on highway capacity[7]

สุวิช เพชรชมภูพันธ์[8] วิเคราะห์ค่าความจุสำหรับถนน 6 ช่องจราจรซึ่งมีการจอดรถข้างทางในชั่วโมงเร่งด่วน ด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค VISSIM Kim[9] ได้ทำการพัฒนาแนวทางในการประมาณค่าความจุของถนนสองช่องจราจรภายใต้ลักษณะทางกายภาพและสภาพการจราจร ในช่วงถนน Science Park Road และHighway 322 ใน Pennsylvania และศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบกับความจุได้แก่ เขตห้ามแซง จุดเชื่อมต่อ โค้งราบ โค้งดิ่ง ขีดจำกัดความเร็ว และสัดส่วนของรถบรรทุก โดยได้ทำการพัฒนาแบบจำลอง TWOSIM (Two-lane, two-way highway SIMulator) Arkatkar[10] กล่าวว่า ปัญหาในการวัดค่าปริมาณจราจรที่มียวดยานหลากหลายประเภทสามารถจัดการได้โดยการแปลงยวดยานให้เป็นหน่วยเทียบเท่ารถยนต์ส่วนบุคคลต่อชั่วโมง (PCU/hr) นอกจากนั้นผลของการแปรผันของปริมาณจราจร ความกว้างของผิวถนน ขนาดของความลาดชันยังมีผลต่อการกำหนดค่า PCU ที่เหมาะสมด้วย จึงได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจร HETEROSIM ซึ่งพัฒนาโดย Arasan and Koshy ในปี 2005 ในการวิเคราะห์ความจุของช่องถนนหลายช่องจราจร ในประเทศอินเดีย จากการสร้าง Speed-Volume Curves ที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจร แสดงให้เห็นว่า ความจุของถนน 4 ช่องจราจร และ 6 ช่องจราจร มีค่าเท่ากับ 4,600 PCU/hr และ 7,200 PCU/hr ในกรณีที่มีความลาดชัน 2%, 3%, 4%, 5% และ 6% ที่ระยะความยาว1,600 เมตร ความจุมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 4,300 4,100, 3,900, 3,700 และ 3,600 PCU/hr ตามลำดับ Madhu and S. Velmurugan[11] ประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค PARAMICS สำหรับวิเคราะห์ความจุของทางด่วน 8 ช่องจราจร ในประเทศอินเดีย ซึ่งได้พิจารณาเงื่อนไขและผลกระทบจากสภาพการจราจรที่ประกอบด้วยยวดยานหลากหลายประเภท (Heterogonous Traffic) โดยค่าความจุของทางด่วนที่ได้ทำการพิจารณาผลจากการขับขี่บนช่องจราจรเสมือน (Virtual Lanes)ที่เกิดจากยวดยานขับขี่นอกขอบเขตช่องจราจรจนทำให้ช่วงถนน 4 ช่องจราจรต่อทิศทาง มีการขับขี่เสมือนเป็น 8 ช่องจราจรต่อทิศทาง (Figure 6) มีค่าประมาณ 11,435 PCU/hr/dir ซึ่งสูงกว่าสภาพการจราจรที่ไม่มีช่องจราจรเสมือนอย่างชัดเจนประมาณ 15%

Figure 6 Vehicles travelling in eight virtual lanes on the divided urban expressway in India[11]

Munehiro et al.,[12] ศึกษาผลของมาตรการในการปรับปรุงทางหลวงสองช่องจราจรให้เป็น“ทางหลวง2+1 ช่องจราจร” (Figure 7) ของทางหลวงหมายเลข 38 ในประเทศญี่ปุ่น โดยการเพิ่มช่องจราจรชั่วคราว (Auxiliary Lanes) ยาวช่วงละ 1.5 กิโลเมตร พร้อมเปรียบเทียบผลการประเมินก่อนและหลังการปรับปรุงผ่านการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยใช้โปรแกรม SIM-R Traffic Flow ในการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ทั้งสภาพผิวจราจรแบบแห้งและมีหิมะพบว่าสำหรับกรณีที่กำหนดปริมาณจราจร 500 คันต่อชั่วโมง ภายใต้สภาพผิวจราจรแบบแห้งสามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางขึ้น 10 – 14 กม./ชั่วโมง และลด Follower Density ลง 2 – 5 คัน/กม. ในกรณีสภาพผิวจราจรแบบมีหิมะสามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางขึ้น 7 – 15 กม./ชั่วโมง และลด Follower Density ลง 4 – 8 คัน/กม.

Figure 7 Capacity analysis on “2+1 lane”[12]

Bains et.,al.[13] ประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงความจุของถนนเมื่อเพิ่มระดับของการปฏิบัติตามขีดจำกัดความเร็วบนทางด่วน Mumbai-Pune Expressway ในภาคตะวันตกของประเทศอินเดีย ซึ่งมีความน่าสนใจในการศึกษาด้วยเหตุผลหลักสองประการ คือ การมียวดยานหลากหลายประเภท

(Multi-Class with Vehicles) และการไม่ขับขี่บนช่องจราจรอย่างเป็นระเบียบ (Poor Lane Discipline)โดยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค VISSIM ทั้งนี้ได้ทำการประมาณค่าความจุของช่วงถนนในสถานการณ์จำลองของการจำกัดความเร็วต่างๆ ได้แก่ 80, 70 และ 60 กม./ชม. และระดับการปฏิบัติตามขีดจำกัดความเร็ว 10%, 30%, 50%, 70% และ 90% พบว่า เมื่อเพิ่มระดับการปฏิบัติตามกฎหมายขีดจำกัดความเร็ว ทำให้ความจุของช่วงถนนเพิ่มสูงขึ้น

การเปรียบเทียบผลการประมาณค่าความจุของช่วงถนนโดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคกับวิธีของ Highway Capacity Manual (HCM)

การประมาณค่าความจุโดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคมักจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความจุที่ได้กับการประมาณค่าความจุด้วยวิธีการอื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความสามารถของแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคในการประมาณค่าความจุในสภาพการจราจรจริงที่ให้ค่าความจุที่สมเหตุสมผลมากกว่า ปิยวัฒน์ ทองเกรียว[14] ศึกษาแนวทางและขั้นตอนในพัฒนาแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคVISSIM เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าความจุและระดับการให้บริการของถนนขนาด 4 ช่องจราจร มีฉนวนกั้นและมีไหล่ทางโดยคำนึงถึงการใช้งานจริงซึ่งมีผลกระทบจากความถี่ของทางเชื่อมและจุดกลับรถ ซึ่งค่าของความจุของถนนที่ได้จากแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคมีค่าใกล้เคียงกับของ HCM ในช่วงที่มีความหนาแน่นของปริมาณจราจรน้อยๆเนื่องจากยังไม่มีผลกระทบจากยานพาหนะที่ออกมาจากทางเชื่อมหรือจากจุดกลับรถมารบกวนในขณะที่ค่าของความจุจากแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคจะมีค่าน้อยกว่าค่าความจุที่คำนวณได้จากวิธีการ HCM เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดัง Table 2

Table 2 Capacity Analysis of the four-lane highway at various Level of Service (LOS)[14]

ปริมาณจราจร	ความหนาแน่น (Veh/km/ln)				
	7 (LOS A)	11 (B)	16 (C)	22 (D)	28 (E)
HCM2000	466	732	1,064	1,463	1,862
VISSIM	470	717	1,004	1,318	1,596
ร้อยละความแตกต่าง	-0.88	2.00	5.61	9.95	14.29

Kim[9] พัฒนาแบบจำลอง TWOSIM (Two-lane, two-way highway SIMulator) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนน 2 ช่องจราจรซึ่งมีค่าสูงกว่า HCM2000 ซึ่งมีค่า 1,700 pc/hr/dir (3,200 pc/hrสำหรับสองทิศทาง) ในทุกๆ ความเร็วในการไหลอิสระเฉลี่ย (Table 3) นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ (1) ไม่มีรถบรรทุกในกระแสจราจร ความจุที่ได้จะลดลงเมื่อมีทางเชื่อม 10-12% เมื่ออยู่ในช่วงโค้งแนวราบ ความจุลดลง 3-17% และช่วงที่ลาดชันขึ้น ความจุลดลง 11-30% และเมื่อเพิ่มการยกโค้งจะทำให้ความจุลดลง 8 -24% กรณีที่ (2) เมื่อมีรถบรรทุกในกระแสจราจร 10-30% ความจุที่ได้ลดลงเมื่อมีทางเชื่อม 10-23% เมื่ออยู่ในช่วงโค้งแนวราบที่มีรัศมีน้อยกว่า 500 ฟุต ความจุลดลง 3-26% และช่วงที่ลาดชันขึ้น ความจุลดลง 11-40% และเมื่อเพิ่มการยกโค้งจะทำให้ความจุลดลง 16-31%

Table 3 Compare the capacity estimation of two-lane highway between the TWOSIM and HCM2000[9]

ความเร็วในการไหลอิสระ (mi/hr)	TWOSIM (pc/hr)	HCM2000 (pc/hr)
70	2,100	1,700
60	2,100	
50	2,000	
40	1,850	

Anamika et al.,[15] วิเคราะห์ความจุโดยใช้หลักการทางสถิติ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรทั้งแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression) และสมการถดถอยไม่เชิงเส้น (Non-Linear Regression) ซึ่ง Speed-Flow Curve ที่วิเคราะห์โดยสมการถดถอยเชิงเส้นตรงมีความแม่นยำสูงกว่า โดยมีผลค่าความจุประมาณ 4,500 PCU/hr/dir ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความจุด้วย Traditional Model และวิธีของ HCM ดังแสดง Table 4

Table 4 Speed-Flow Equations and Capacity Values Comparison with Values Adopted in International Standards[15]

Section	Microscopic Simulation Method	Traditinal Method	International Standards
Towards Mathura	Y=-0.0057X+51.173 R^2 = 0.708 (C=4488 PCU/hr/dir)	Y=-0.0065X+58.27 R^2 = 0.1 (C=4482PCU/h/dir)	US HCM = 4800 PCU/hr/dir Indonesia HCM = 4600 PCU/hr/dir
Towards Delhi	Y=-0.0062X+54.205 R^2 = 0.693 (C=4461PCU/hr/dir)	Y=-0.0064X+57.46 R^2 = 0.09 (C=4468PCU/hr/dir)	

สรุป

การวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนด้วยวิธี Indirect-Empirical Method นับว่าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถลดข้อจำกัดและความยุ่งยากในการสำรวจข้อมูลในภาคสนามได้เป็นอย่างมาก โดย Highway Capacity Manual (HCM) ถือเป็นแนวทางในการประมาณค่าความจุของช่วงถนนด้วยวิธี Indirect Empirical Method ซึ่งได้รับความนิยมสูงสุดและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นแนวทางและมาตรฐานได้ถูกพัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกา ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์โดยตรงได้ในหลายๆ ประเทศ เนื่องจากเงื่อนไขของสภาพการจราจรที่มีความแตกต่างกันของแต่ละพื้นที่ การประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคจึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งของในการประมาณค่าความจุของช่วงถนนด้วยวิธี Indirect Empirical Method ถึงแม้ว่าอาจมีข้อจำกัดของข้อมูลนำเข้าและตัวแปรในแบบจำลองที่มีจำนวนมากแต่จากการทบทวนผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและความสามารถในการจำลองสถานการณ์ เงื่อนไข และพฤติกรรมของผู้ขับขี่ยวดยานแต่ละคันได้อย่างละเอียด ซึ่งสามารถสะท้อนลักษณะเฉพาะของการจราจรในแต่ละพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ผลการวิเคราะห์ค่าความจุของช่วงถนนที่มีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น รวมทั้งจะเป็นแนวหนึ่งทางในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ความจุของช่วงถนนและทางหลวงในประเทศไทยที่น่าสนใจในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. M.M.Minderhoud, H.Botma and P.H.L.Bovy. Assessment of Roadway Capacity Estimation Methods. Transportation Research Record 1572;1997, pp.59-67.
2. Transport Research Board (TRB). Highway Capacity Manual 2000. 4th Ed., National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C.; 2010.
3. Federal Highway Administration. Procedures for Estimating Highway Capacity Multilane Highway Capacity. Available from https://www.fhwa.dot.gov/ohim/hpmsmanl/appn2.cfm. Accessed July 8, 2017.
4. Fred L. Mannering and Scott S. Washburn. Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis, The 5th edition. Wiley Global Education.; 2013.
5. Geetam Tiwari, Joseph Fazio, Sushant Gaurav and Niladri Chatteerjee. Continuity Equation Validation for Nonhomogeneous Traffic. JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING © ASCE. Vol134 no.3; 2008. pp118-127.
6. Central Road Research Institute. Development of Indian Highway Capacity Manual (Indo-HCM). 12th Five Year Plan Project.; 2014.
7. ลัดดา ตันวาณิชกุล, จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร และปิยวัฒน์ ทองเกรียว. การศึกษาแนวทางสำหรับเกณฑ์ในการออกแบบหน้าตัดของทางหลวงจากปริมาณจราจรโดยใช้แบบจำลองระดับจุลภาค," KKU ENGINEERING JOURNAL, July-September 2012; 39(3):241-248.
8. สุวิช เพชรชมภูพันธ์. การวิเคราะห์ความจุบนถนนสายหลักโดยแบบจำลองระดับจุลภาค กรณีศึกษาถนนอ่อนนุช - ลาดกระบัง ช่วงทางด่วนหมายเลข 9 กับทางแยกแยกกิ่งแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.; 2556.
9. Joon Hyo Kim. Capacity Estimation Method for Two-Lane, Two-Way Highways Using Simulation Modeling. A Thesis in Civil Engineering, Department Of Civil Engineering, The Graduate School, The Pennsylvania State University,; 2006.
10. Shriniwas S. Arkatkar. Effect of Intercity Road Geometry on Capacity under Heterogeneous Traffic Conditions Using Microscopic Simulation Technique. International Journal of Earth Sciences and Engineering 375, ISSN 0974-5904, Volume 04, No 06 SPL; 2011, pp. 375-380.

11. Madhu and S. Velmurugan, “Estimation of Roadway Capacity of Eight-lane Divided Urban Expressways under Heterogeneous Traffic Through Microscopic Simulation Models,” International Journal of Science and Technology Education Research Vol. 1(6),;2011, pp. xxx – xxx.
12. Kazunori Munehiro, Azuma Takemoto, Naoto Takahashi, Masayoshi Watanabe, Motoki Asano “Performance Evaluation for Rural Two-Plus-One-Lane Highway in a Cold, Snowy Region,” Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board.;2012, 2272(-1):161-172.
13. Manraj Singh Bains, Anshuman Bhardwaj, Shriniwas Arkatkar, S. Velmurugan, “Effect of Speed Limit Compliance on Roadway Capacity of Indian Expressways,”Procedia - Social and Behavioral Sciences,;2013, 104 (2013) 458 – 467.
14. ปิยวัฒน์ ทองเกรียว. การพัฒนาแบบจาลองระดับจุลภาคเพื่อหาความจุและระดับการให้บริการของถนนกรณีศึกษาอาเภอเมืองจังหวัดขอนแก่น.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น,; 2555.
15. Yadav Anamika, Arun Ashutosh and Velmurugan S. Roadway Capacity Estimation For Multi-Lane Inter-Urban Highways In India. Colloquium on Transportation Systems Engineering and ManagementCTR, CED, NIT Calicut, India,; 2014.