



การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 4 ช่วง กม. 67+334 ถึง กม. 111+457

ณัฏพล มณีแดง บรรพต กุลสุวรรณ และ นิภาวรรณ กุลสุวรรณ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3435 1851 อีเมล: fengnpw@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.01.001

รับเมื่อ 14 ธันวาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 4 เมษายน 2565 ตอรับเมื่อ 10 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 10 มกราคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสื่อมสภาพผิวทางจากปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุกและปริมาณน้ำฝน บนทางหลวงหมายเลข 4 ช่วง กม. 67+334 ถึง 111+457 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แบบจำลองที่สร้างจากวิธีลูกโซ่มาร์คอฟมาคาดคะเนความเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์ โดยนำข้อมูลดัชนีความขรุขระสากลในช่วง พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2561 เป็นดัชนีในการบ่งบอกสภาพผิวทาง จากนั้นทำการสอบเทียบแบบจำลองจากข้อมูลจริง จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอายุผิวทาง (ปี) และดัชนีความขรุขระสากล สอดคล้องกับสมการเอกซ์โพเนนเชียล โดยมีค่า R-square (R^2) จากสมการที่สร้างจากปัจจัยที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0.892–0.987 ทั้งนี้มีข้อเสนอแนะว่าหากมีจำนวนข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองที่มากเพียงพอ จะสามารถนำแบบจำลองที่สร้างจากวิธีลูกโซ่มาร์คอฟมาใช้ในการคาดคะเนความเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์ที่ทำการจัดกลุ่มปัจจัยจากปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุกและปริมาณน้ำฝน ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการวางแผนการจัดสรรงบประมาณในงานบำรุงรักษา กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

คำสำคัญ: ผิวทางแอสฟัลต์ ลูกโซ่มาร์คอฟ ดัชนีความขรุขระสากล การเสื่อมสภาพของผิวทาง

การอ้างอิงบทความ: ณัฏพล มณีแดง, บรรพต กุลสุวรรณ และ นิภาวรรณ กุลสุวรรณ, “การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์ด้วยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 4 ช่วง กม. 67+334 ถึง กม. 111+457,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 241-075685, ม.ค.-มี.ค. 2567.



Development of the Asphalt Pavement Deterioration Model Using the Markov Chain: Case Study of the State Highway Number 4 at Km. 67+334 to 111+457

Nutchapon Maneedang, Bunpoat Kunsuwan and Nipawan Kunsuwan*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Kamphaengsaen, Kasetsart University Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 3435 1851, E-mail: fengnpw@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.01.001

Received 14 December 2021; Revised 4 April 2022; Accepted 10 May 2022; Published online: 10 January 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research developed the asphalt pavement deterioration model by using the Markov chain theory. Three factors were selected as the effect of asphalt pavement condition: 1) traffic volume, 2) truck weight and 3) rainfall intensity. The methodology was applied to highway no.4 from Km. 64+334 to Km. 111+457. The purpose of this paper was to study the possibility to use that model developed by using the Markov chain theory to forecast the future performance of pavement in terms of the International Roughness Index (IRI). The data of IRI was collected from 2013 to 2018. The developed model was then verified by the actual IRI data. The relationship between age (year) and IRI (mm/km) suggested that an exponential model might be appropriate. The Exponential models could be fit to data with R-square (R^2) in range 0.892–0.987. It could be suggested that if there is enough IRI data, the model developed based on the Markov chain theory by focusing on three affected factors will be used to forecast the deterioration of asphalt pavement. The result will be useful for developing a budget allocation with relevant agencies for future maintenance activities.

Keywords: Asphalt Pavement, Markov Chain, International Roughness Index, Pavement Deterioration

Please cite this article as: N. Maneedang, B. Kunsuwan, and N. Kunsuwan, "Development of the asphalt pavement deterioration model using the markov chain: Case study of the state highway number 4 at Km. 67+334 to 111+457," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–14, ID. 241-075685, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

การประเมินสภาพผิวทางเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการบริหารจัดการงบประมาณ รวมถึงการวางแผนงานในการซ่อมบำรุง [1] ได้กล่าวว่าปริมาณจราจรเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหาย มีสาเหตุมาจากการที่พื้นทางรับน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำไปซ้ำมาเป็นระยะเวลานาน จนเกิดการเคลื่อนตัว สึกหรือ หรือความล้าของโครงสร้างทาง และมีจำนวนที่มากกระทำมากกว่าที่ออกแบบ ซึ่งการประเมินสภาพของผิวทางว่ามีความเสียหายถึงระดับที่ควร จะได้รับการซ่อมแซมแล้วนั้น มีการตรวจสอบได้หลายวิธีในประเทศไทย [2] ได้กล่าวไว้ว่าหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการตรวจสอบจะพิจารณาการซ่อมบำรุงรักษาด้วยการใช้การประเมินสภาพทางโดยใช้สายตา (Visual Inspection Rating) [3] โดยใช้ข้อมูลลักษณะความเสียหาย ปริมาณความเสียหาย ประกอบกับหลักเกณฑ์ในการพิจารณาต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจากวิธีนี้มีโอกาสคลาดเคลื่อนและมีความแตกต่างกันระหว่างผู้ประเมินสูง เนื่องจากการประเมินขึ้นอยู่กับความคิดเห็นของผู้ทำการสำรวจ เพื่อให้การพิจารณาสภาพผิวทางเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้มีการนำอุปกรณ์มาใช้ในการสำรวจและประเมินสภาพความเสียหายผิวทางที่แสดงถึงค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index; IRI) นำมาใช้พิจารณาประกอบกับการประเมินเพื่อซ่อมบำรุง [4] ซึ่งค่าดัชนีความขรุขระสากลสามารถแสดงถึงสภาพบริการของสายทางที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในด้านผิวทางและการบำรุงรักษาได้ดียิ่งขึ้น มีหน่วยเป็นเมตรต่อกิโลเมตร [5] ได้พัฒนาแบบจำลองสภาพความเสียหายของผิวทางลาดยาง โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความขรุขระสากลกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของผิวทาง ได้แก่ อายุผิวทางหลังการซ่อมบำรุงผิวแอสฟัลต์ ปริมาณจราจร สัดส่วนรถหนัก ปริมาณน้ำฝนต่อปี และความลาดชันของภูมิประเทศ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดเป็นฟังก์ชัน Exponential [6] พัฒนาแบบจำลองการทำนายค่า PCI โดยอาศัยค่าจาก IRI ที่แม่นยำและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการภาคสนามในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยผล

การทดลองได้แบ่งแบบจำลองออกไปตามประเภทวัสดุของผิวทาง ได้แก่ ผิวทางแอสฟัลต์ ผิวทางวัสดุรวม และผิวทางคอนกรีต

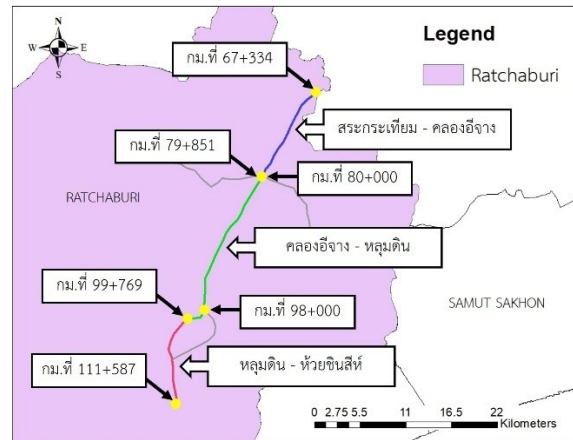
ถึงแม้ว่าปริมาณจราจรจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหาย ยังมีการศึกษาถึงปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อให้ถนนเกิดการเสื่อมสภาพ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งน้ำฝนก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างของถนนเกิดความเสียหาย ซึ่งหากมีปริมาณน้ำฝนที่มากจนเกินไปอาจทำให้ไม่สามารถระบายน้ำได้ทัน จนกระทั่งทำให้โครงสร้างของถนนเกิดการชำรุด ความเสียหายของถนนอาจเกิดได้จากการกัดเซาะของแม่น้ำหรือคลองที่มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย [7] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับค่าปริมาณน้ำฝนรายปี ซึ่งพบว่าบริเวณพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนมากจะส่งผลให้ความเสียหายของผิวทางมากขึ้นตามไปด้วย [8], [9] ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางเพื่อใช้ในการทำนาย โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหาย ได้แก่ ข้อมูลชนิดผิวทาง ปริมาณการจราจร ปริมาณน้ำฝน และความลาดชันของภูมิประเทศ [10] ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของทางลาดยางชนิดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เลือกพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายแก่ผิวทาง ได้แก่ ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี สภาพความเสียหายของทาง และความแข็งแรงของโครงสร้างทางจากการวิเคราะห์พบว่า สายทางที่มีความแข็งแรงมากจะมีความเร็วในการเสื่อมสภาพทางน้อยที่สุด หากเปรียบเทียบกันระหว่างสายทางที่มีปริมาณจราจรเท่ากัน แต่ในขณะเดียวกันในสายทางที่มีความแข็งแรงเท่ากันแต่มีปริมาณจราจรที่แตกต่างกันพบว่า สายทางที่มีปริมาณจราจรสูงจะมีอัตราในการเสื่อมสภาพเร็วกว่าสายทางที่มีปริมาณจราจรต่ำ [11]–[14] ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการประเมินสภาพความเสียหายของถนน โดยนำเสนอปัจจัยที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหาย ได้แก่ ปริมาณจราจร ปริมาณรถบรรทุก ภูมิอากาศ อายุของผิวทาง ลักษณะความเสียหายของผิวทาง ลักษณะโครงสร้างของถนน และความหนาของผิวทาง โดยวิธีต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจในการบำรุงรักษาถนนต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสียหายของผิวทาง

Factor	Literature Review				
	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]-[14]
Type		✓			
Traffic Characteristics		✓	✓	✓	✓
Climate	✓	✓			✓
Gradient		✓			
Age					✓
Pavement Distress				✓	✓
Structural Characteristics				✓	✓
Pavement Thickness					✓

ในการศึกษานี้ได้นำปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหาย ได้แก่ ปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุก และปริมาณน้ำฝน มาพิจารณาพร้อมกับการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับอายุการใช้งานของถนน เพื่อพยากรณ์สภาพความเสียหายของผิวทางในอนาคตซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนบำรุงรักษาถนนให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับวิธีการพยากรณ์ในบทความนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ [15] ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวแปรที่สนใจในปัจจุบัน เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมของตัวแปรนั้นในอนาคต สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายปัญหาต่างๆ เช่น ประชากรศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น [16]-[18] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพน้ำโดยการแปลงพลังงานของระบบโดยใช้เซลล์จากแสงอาทิตย์ หรือเป็นการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการเดินทางด้วยรถไฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการเดินทาง และการประยุกต์ใช้แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ เพื่อทำนายรูปแบบการเสื่อมสภาพของระบบน้ำเสีย แม้กระทั่งการประยุกต์ใช้แบบจำลองในงานของถนน เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของผิวทางที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงระยะเวลา [19] ได้พัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของทางโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในแบบจำลองใช้ค่าดัชนีสภาพทาง (Pavement Condition Index; PCI) เป็นตัวแทนสภาพ



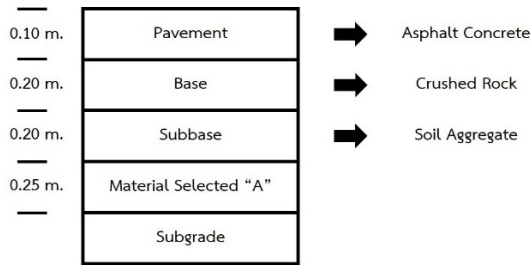
รูปที่ 1 แผนที่โครงการถนนทางหลวงหมายเลข 4 ในพื้นที่ศึกษา ช่วง กม. 67+334 ถึง 111+457

ความเสียหายที่กำหนดให้เป็นตัวแปรตามและอายุของสายทางเป็นตัวแปรอิสระ พบว่าแบบจำลองที่ใช้วิธีลูกโซ่มาร์คอฟสามารถอธิบายพฤติกรรมของทางได้ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้วิธี Constrained Least-Squares [8], [9] ได้พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางลาดยางเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบบริหารงานซ่อมบำรุงทางในการจัดลำดับความสำคัญของสายทางที่จำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุง โดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟในการพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งจัดกลุ่มตามปัจจัยในการวิเคราะห์ ได้แก่ สถานที่ตั้งของสายทาง ปริมาณการจราจร ปริมาณน้ำฝน และความลาดชันของภูมิประเทศ จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าสายทางที่มีปริมาณจราจรสูง ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีสูง หรือมีความลาดชันสูง ส่งผลให้ค่าการเสื่อมสภาพของผิวทางสูงขึ้นตามไปด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ถนนทางหลวงหมายเลข 4 ในจังหวัดราชบุรีซึ่งมีทั้งหมด 3 โครงการ ดังรูปที่ 1 ตารางที่ 2 และมีรายละเอียดของโครงสร้างชั้นทางดังรูปที่ 2 ซึ่งสายทางที่คัดเลือกมานั้นมีปริมาณจราจรที่สูง ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาและนำมาวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 2 รายละเอียดโครงสร้างชั้นทาง

ตารางที่ 2 พื้นที่ศึกษา

โครงการก่อสร้าง	กม. เริ่มต้น	กม. สิ้นสุด	ปริมาณจราจรเฉลี่ย (คัน/วัน)	
			ขาเข้า	ขาออก
สระกระเทียม-คลองอี่จาง	67+334	79+851	26,356	25,213
คลองอี่จาง-หลุมดิน	79+851	99+769	65,506	73,858
หลุมดิน-ห้วยชินสีห์	99+769	111+457	17,319	15,629

หมายเหตุ: ข้อมูลปริมาณจราจรในช่วงขาเข้าและออก ช่วง พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2561

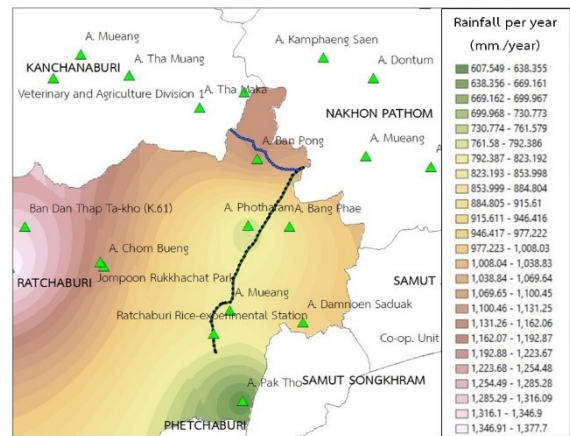
2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.2.1 ค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI)

ค่าดัชนีความขรุขระสากลเป็นค่าที่แสดงถึงความเรียบของถนน ที่บ่งบอกถึงคุณภาพในกับขั้วของผู้ใช้ทาง มีผลการศึกษามากจาก AASHTO Road Test ซึ่งการวัดค่าดัชนีความขรุขระสากลจะอาศัยเครื่องมือ Bump Integrator ที่ติดตั้งอยู่ในรถยนต์ โดยค่าความเรียบของผิวทางสามารถคำนวณได้จากการสั่นสะเทือนของเพลาล้อรถต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ และแปลงมาเป็นค่าดัชนีความขรุขระสากล มีหน่วยเป็นเมตรต่อกิโลเมตร ซึ่งข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลได้รับรวมมาจากการตรวจทางหลวง ใช้ข้อมูล พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2561

2.2.2 ข้อมูลปริมาณจราจร

ข้อมูลปริมาณจราจรถูกจัดเก็บโดยกรมทางหลวง โดยแบ่งจุดสำรวจปริมาณจราจรตามจุดตัดของเส้นทางการเดินทาง เช่น สัญญาณไฟจราจร และทางแยก เป็นต้น ใช้ข้อมูล พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2561 (ดังตารางที่ 2) ซึ่งข้อมูลส่วนนี้จะนำมาแปลงเป็นค่า Equivalent Axle Load; EAL



รูปที่ 3 ตัวอย่างปริมาณน้ำฝนที่ใช้วิธีเส้นชั้นน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา

เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการพิจารณาปัจจัยน้ำหนักบรรทุก

2.2.3 ข้อมูลน้ำฝน

งานวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกสถานีวัดน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาโดยพิจารณาถึงสถานีตรวจวัดเพื่อให้ครอบคลุมถึงพื้นที่ศึกษามากที่สุดซึ่งประกอบไปด้วย 68 สถานีครอบคลุม 6 จังหวัดได้แก่จังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี นครปฐม สมุทรสาคร ราชบุรี และเพชรบุรี

ข้อมูลที่ใช้เป็นปริมาณน้ำฝนรายปี ณ สถานีนั้นๆ จากนั้นจัดทำข้อมูลน้ำฝนด้วยวิธีเส้นชั้นน้ำฝน โดยแสดงค่าปริมาณน้ำฝนดังรูปที่ 3

2.3 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟสามารถใช้ข้อมูลที่ทำกรสำรวจและเก็บรวบรวมโดยไม่ต่อเนื่องกันทุกปีได้ จึงเป็นข้อดีที่สามารถใช้ข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลปัจจุบันในการพิจารณา ซึ่งทำให้ง่ายต่อการพัฒนาแบบจำลอง ดังนั้นแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่พัฒนาโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟจะใช้ข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลในช่วงระยะเวลา 2 ปี ที่ต่อเนื่องกันเพื่อทำการหาเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะของแบบจำลอง โดยมีสมมติฐานว่าเป็นแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Markov Chain) คือแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟที่มีความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาพิจารณา

ณัชพล มณีแดง และคณะ, “การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ: กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 4 ช่วง กม. 67+334 ถึง กม. 111+457.”



เนื่องจากข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ได้จากการเก็บข้อมูลเป็นข้อมูลในรูปแบบเชิงปริมาณ ในการสร้างแบบจำลองอันดับแรกต้องกำหนดช่วงของการเปลี่ยนสถานะของผิวทางเพื่อที่จะนำไปหาความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะในขั้นตอนต่อไป โดยกำหนดค่าดัชนีความขรุขระสากลให้เป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม พิจารณาจากเกณฑ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่กำหนดโดยกรมทางหลวงที่ใช้ระบุความเสียหายของสภาพทางดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ช่วงของสถานะค่าความขรุขระสากล

สถานะ	1	2	3	4	5	6	7
ความกว้างของสถานะ (ม./กม.)	<1.80	1.80-2.20	2.20-2.60	2.60-3.00	3.00-4.00	4.00-5.00	>5.00

ทั้งนี้ในสถานะที่ 1 ถูกพิจารณาให้เป็นถนนที่สร้างเสร็จใหม่ในสายทาง มีค่าดัชนีความขรุขระสากลเริ่มต้นไม่เกิน 1.8 เมตรต่อกิโลเมตร ส่วนในสถานะอื่นๆ สามารถกำหนดความกว้างของช่วงให้สอดคล้องกับข้อมูลที่มี ถ้าหากขาดข้อมูลช่วงของสถานะใดสถานะหนึ่งจะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้จึงทำให้มีช่วงของข้อมูลที่ไม่เท่ากัน

รูปที่ 4 แสดงจำนวนข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีการเปลี่ยนสถานะในช่วงระยะเวลา 2 ปีที่ต่อเนื่องกัน เช่น ข้อมูลในแถวที่ 4 คอลัมน์ที่ 5 หมายความว่า มี 9 ช่วงของสายทางที่มีการเปลี่ยนสถานะจากค่าดัชนีความขรุขระสากลในช่วง 2.60 ถึง 3.00 ไปเป็นช่วงระหว่าง 3.00 ถึง 4.00 และจะสังเกตเห็นได้ว่าข้อมูลในการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีการเปลี่ยนสถานะถอยกลับจากสถานะที่ 2 ไปยังสถานะที่ 1 หรือจากสถานะที่ 3 ไปยังสถานะที่ 2 และ สถานะที่ 1 เนื่องจากแบบจำลองนี้ต้องการคาดการณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นในแต่ละปีเพื่อใช้ในการคาดการณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลในอนาคตที่มีการเสื่อมสภาพของผิวทาง จึงตัดข้อมูลที่มีค่าลดลงในปีต่อเนื่องออก ดังในข้อมูลในแถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 1 หรือแถวที่ 3 คอลัมน์ที่ 1 และ 2 เป็นต้น จะมีค่าเป็น 0 จากนั้นค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะตามช่วงเวลาจะถูกนำไปคำนวณหาความน่าจะเป็น

7	10	0	1	0	0	0
0	10	19	4	2	0	0
0	0	10	14	0	0	0
0	0	0	3	9	1	1
0	0	0	0	9	6	0
0	0	0	0	0	3	0
0	0	0	0	0	0	1

รูปที่ 4 ตัวอย่างเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ

0.3889	0.5556	0	0.556	0	0	0
0	0.2857	0.5429	0.1143	0.0571	0	0
0	0	0.4167	0.5833	0	0	0
0	0	0	0.2143	0.6429	0.0714	0.0714
0	0	0	0	0.6000	0.4000	0
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1

รูปที่ 5 ตัวอย่างเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

ในการเปลี่ยนสถานะดังรูปที่ 5 จึงนำไปเข้าสมการแปลงค่าจากค่าสถานะของผิวทางที่เป็นตัวแปรเชิงกลุ่มไปเป็นค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมการแปลงค่าสถานะของผิวทางเป็นค่าดัชนีความขรุขระสากล

State Range	IRI (m./km.)
1-2	1.6+(0.2×(S-1))
2-3	2.0+(0.4×(S-2))
3-4	2.4+(0.4×(S-3))
4-5	2.8+(0.4×(S-4))
5-6	3.5+(1.0×(S-5))
6-7	4.5+(1.0×(S-6))

ตัวอย่างแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง ที่มีค่าดัชนีความขรุขระสากลเริ่มต้นเท่ากับ 1.6 เมตรต่อกิโลเมตร และมีเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะดังรูปที่ 4 และ 5 ค่าสถานะสภาพของผิวทาง (S) และมีค่าดัชนีความขรุขระสากลที่คาดการณ์จากแบบจำลองในช่วงระยะเวลาต่างๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคาดการณ์ของการเปลี่ยนสถานะและค่าดัชนี
ความขรุขระสากล

Year	1	2	3	4	5	6	7
State	1.00	1.72	2.58	3.35	4.06	4.67	5.13
IRI	1.60	1.74	1.92	2.54	2.82	3.07	3.63

แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางถูกสร้างขึ้นโดยพิจารณาเกณฑ์จาก 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีที่มีค่าน้อยกว่า 30,000 คันต่อวัน และมากกว่า 30,000 คันต่อวัน ตามลักษณะข้อมูลแต่ละช่วงทาง (ตารางที่ 2) 2) EAL ที่มีค่าน้อยกว่า 30,000 คันต่อวันและมากกว่า 30,000 คันต่อวัน และ 3) ปริมาณน้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี และมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี

3. ผลการทดลอง

จากการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางได้มีการพิจารณาค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สร้างจากแบบจำลองควบคุมไปกับค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้กี่ปี พบว่าข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลา 2 ปี ขึ้นไป ส่วนมากมีค่าอยู่ในช่วงระยะเวลาระหว่างปีที่ 1 ถึงปีที่ 7 สอดคล้องกับข้อมูลการซ่อมแซมผิวทาง ซึ่งส่วนใหญ่จะดำเนินการอยู่ในช่วงเวลา 7 ปี [20] แบบจำลองนี้จึงเลือกใช้อายุผิวทางที่สามารถคาดการณ์ได้ทั้งหมด 7 ปี

หลังจากได้แบบจำลองแล้ว ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทาง โดยนำค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริง พล็อตลงในแบบจำลองที่สร้าง หากชุดข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริง มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 2 ปี จะทำการพล็อตโดยนำค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงในปีแรกเริ่ม ให้มีอายุผิวทางเริ่มต้นอยู่ในช่วงอายุของผิวทางจากแบบจำลอง ณ จุดที่มีค่าดัชนีความขรุขระสากลเท่ากับกับค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สร้างจากแบบจำลอง และในปีที่ 2 ก็ทำการพล็อตต่อจากค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีอายุของผิวทางเริ่มต้น จากนั้นตรวจสอบ

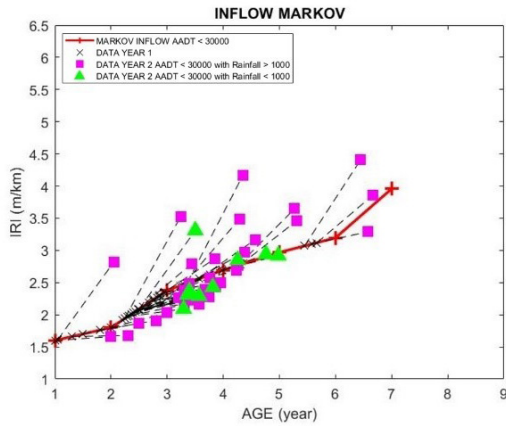
แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สร้างจากแบบจำลองว่ามีความสอดคล้องกันกับค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่

3.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยค่าปริมาณจราจร

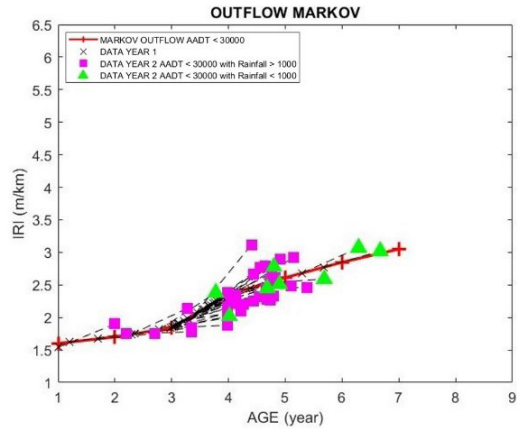
แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณจราจรที่มีค่าน้อยกว่า 30,000 คันต่อวัน และมากกว่า 30,000 คันต่อวันในช่วงขาเข้าและขาออก แสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า แนวโน้มโดยรวมของการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลจากการสอบเทียบด้วยข้อมูลจริง แต่มีบางช่วงของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงในปีที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สร้างจากแบบจำลอง ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่นที่ทำให้ถนนเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น เช่น ปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่มากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ ในทางตรงข้าม บางช่วงของถนนที่มีค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริงในปีที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สร้างจากแบบจำลอง อาจมีสาเหตุมาจากในพื้นที่บางช่วงของถนนที่อยู่ในกลุ่มของปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ถนนเกิดการเสื่อมสภาพช้ากว่าในกรณีที่มีค่าปริมาณน้ำฝนมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี

ผลจากการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณจราจรและ EAL ในเส้นทางขาเข้าและขาออกด้วยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ถูกนำไปพัฒนาเป็นความสัมพันธ์ พบว่าสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีค่า R-squared (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยกำหนดให้ y คือ ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ทำนายจากแบบจำลอง และ x คือ อายุผิวทาง แสดงดังรูปที่ 10 และ 11

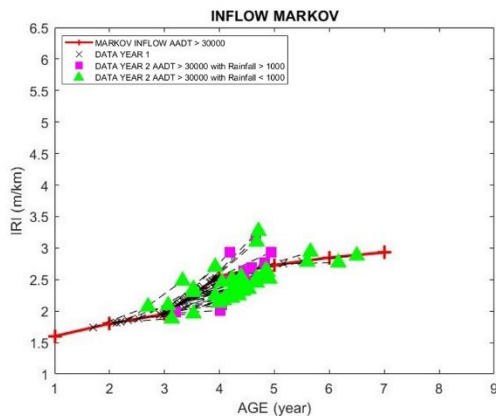
แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางตามรูปที่ 10 พบว่าปริมาณจราจรที่น้อยกลับส่งผลให้ค่าดัชนีความขรุขระสากลมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่ากลุ่มที่มีปริมาณจราจรที่มากกว่า



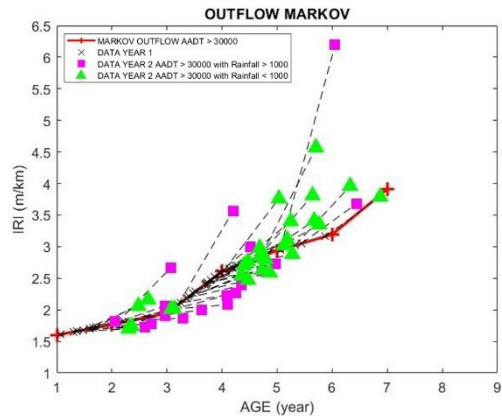
รูปที่ 6 แบบจำลอง IRI ช่วงขาเข้า (ปริมาณจราจร < 30,000 คัน/วัน)



รูปที่ 8 แบบจำลอง IRI ช่วงขาออก (ปริมาณจราจร < 30,000 คัน/วัน)



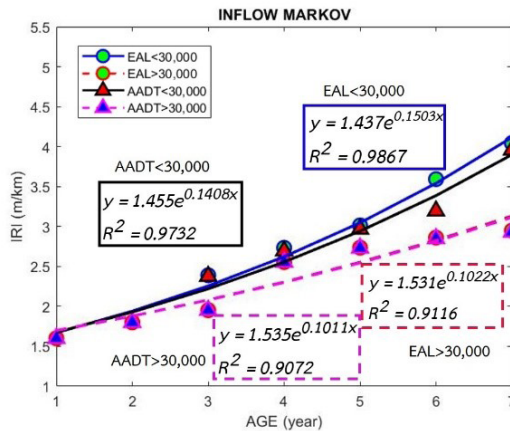
รูปที่ 7 แบบจำลอง IRI ช่วงขาเข้า (ปริมาณจราจร > 30,000 คัน/วัน)



รูปที่ 9 แบบจำลอง IRI ช่วงขาออก (ปริมาณจราจร > 30,000 คัน/วัน)

ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ อาจมีสาเหตุมาจาก ลักษณะโครงข่ายของถนนที่มีทางแยกอยู่บริเวณ กม.ที่ 80 และ กม.ที่ 98 (ดังรูปที่ 1) ทำให้มีปริมาณจราจรไหลเวียนเข้า และออกพื้นที่บริเวณนี้จำนวนมาก ถนนจึงเกิดความเสียหาย ในรูปแบบต่างๆ ที่มักพบเห็นเป็นการเกิดร่องล้อ เนื่องจาก พื้นทางรับน้ำหนักเข้าไปมาในพื้นที่บริเวณนี้เป็นจำนวนมาก จนถนนเกิดความล้าภายในโครงสร้าง [21] จึงทำให้ถนน เสื่อมสภาพเร็วกว่าการออกแบบกำหนดจนต้องมีการ ซ่อมแซมอยู่บ่อยครั้ง เป็นเหตุให้ค่าดัชนีความขรุขระสากล ที่วัดได้มีค่าที่ต่ำอย่างต่อเนื่อง

ในเส้นทางขาออกรูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่ง ผลกระทบให้ถนนเกิดความเสียหายเป็นไปตามสมมติฐานที่ ตั้งไว้ กล่าวคือ ปริมาณจราจรที่มากจะส่งผลให้ค่าดัชนีความ ขรุขระสากลมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าปริมาณจราจรที่มี ค่าน้อย นอกจากนี้ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากปัจจัยค่า EAL แสดงให้เห็นแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับปัจจัยปริมาณ จราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีที่ไม่มีการจำแนกยานพาหนะ ดังนั้น กล่าวได้ว่า ในการสร้างแบบจำลองคาดการณ์ความเสื่อมสภาพ ของผิวทาง สามารถใช้ข้อมูลปริมาณจราจรหรือ EAL จะให้ แนวโน้มของสมการเป็นไปในทางเดียวกัน

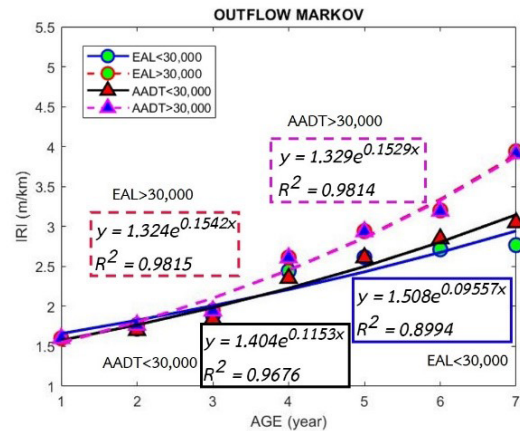


รูปที่ 10 แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณจราจรและ EAL ในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลของเส้นทางขาเข้า

ผลจากการสร้างแบบจำลองในเส้นทางขาเข้า (รูปที่ 10) และขาออก (รูปที่ 11) พบว่า มีแนวโน้มที่ต่างกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลทางด้านกายภาพประกอบพบว่า ช่วงขาเข้า ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโครงข่ายจากเส้นทางอื่นตัดผ่าน จึงมีปริมาณรถที่สูง เป็นเหตุให้ถนนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่ากำหนด ทำให้มีการซ่อมแซมอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ค่าดัชนีความขรุขระสากลในช่วงขาเข้ามีค่าที่ต่ำกว่าในช่วงขาออก ทั้งที่มีปริมาณจราจรที่สูงเช่นเดียวกัน

3.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยค่าปริมาณน้ำฝน

แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี และมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี ในช่วงขาเข้าและขาออก แสดงดังรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 15 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า มีผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณจราจร คือ มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าดัชนีความขรุขระสากลจากการสอบเทียบด้วยข้อมูลจริง สอดคล้องกับสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีค่า R-squared (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดแสดงดังรูปที่ 16 และ 17 แต่ในส่วนของ

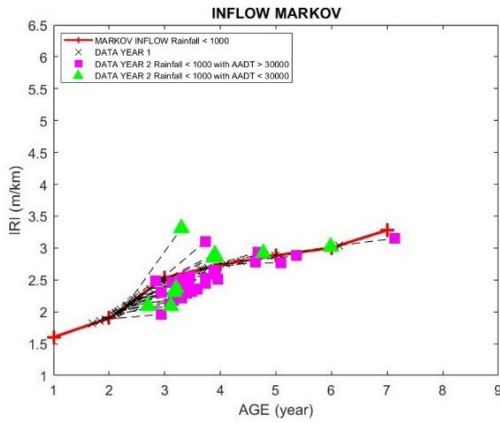


รูปที่ 11 แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณจราจรและ EAL ในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลของเส้นทางขาออก

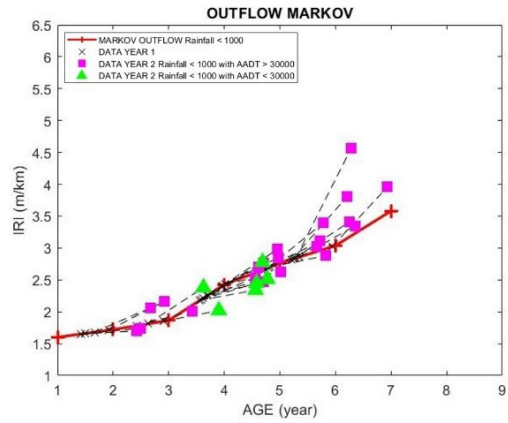
ปัจจัยปริมาณน้ำฝนพบว่า มีถนนบางช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนที่น้อย และมีปริมาณจราจรที่น้อย แต่มีการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มากกว่าจากแบบจำลอง หรืออีกส่วนที่มีปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่มาก และมีปัจจัยปริมาณจราจรที่มากเช่นกัน แต่กลับส่งผลให้ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกิดขึ้นจริง มีการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าจากแบบจำลอง ซึ่งสาเหตุนี้อาจเกิดจากลักษณะโครงข่ายของถนนที่มีทางแยก จะมีปริมาณจราจรที่ไหลเวียนเข้ามามาก ทำให้ถนนเกิดความเสียหายเร็วขึ้น จึงทำให้มีการซ่อมแซมอยู่เป็นประจำ จึงทำให้ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่วัดได้มีค่าต่ำ อีกประการหนึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ช่วงเวลาที่เก็บค่า IRI เป็นช่วงก่อนหรือหลังจากที่มีการซ่อมแซมผิวทาง จึงอาจทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

3.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางที่พิจารณาทั้งปัจจัยปริมาณจราจรและปริมาณน้ำฝน

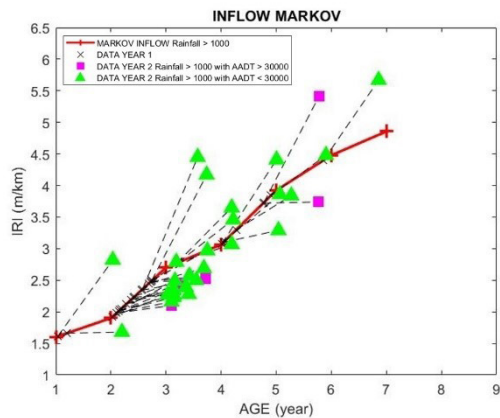
แบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่พิจารณาทั้ง 2 ปัจจัย โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 มีปัจจัยปริมาณจราจรที่เท่ากัน แต่มีปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่ต่างกัน ในเส้นทางขาออก และกรณีที่ 2 มีปัจจัยปริมาณจราจรต่างกัน แต่มีปัจจัยปริมาณน้ำฝนที่เท่ากัน ในเส้นทางขาออก แสดงดังรูปที่ 18 แต่ในส่วนของเส้นทางขาเข้าไม่สามารถนำมาสร้าง



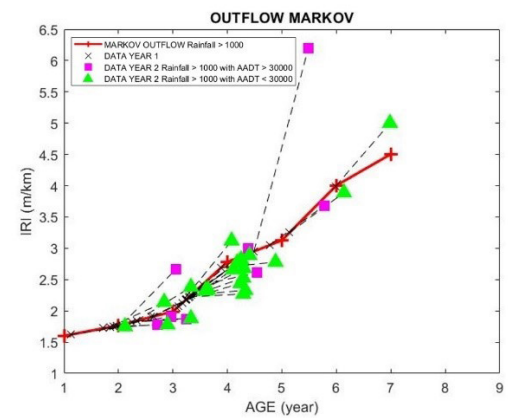
รูปที่ 12 แบบจำลองจากปัจจัยค่าปริมาณน้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1,000 มม.ต่อปี ช่วงขาเข้า



รูปที่ 14 แบบจำลองจากปัจจัยค่าปริมาณน้ำฝนที่มีค่าน้อยกว่า 1,000 มม.ต่อปี ช่วงขาออก



รูปที่ 13 แบบจำลองจากปัจจัยค่าปริมาณน้ำฝนที่มีค่ามากกว่า 1,000 มม.ต่อปี ช่วงขาเข้า



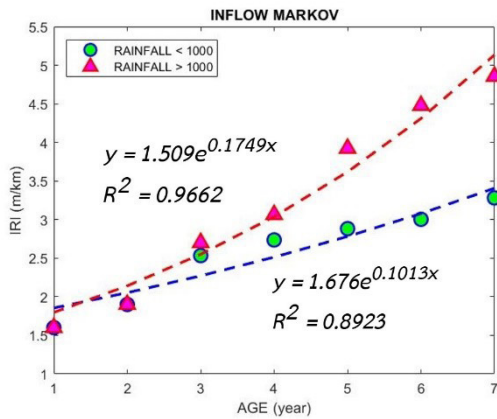
รูปที่ 15 แบบจำลองจากปัจจัยค่าปริมาณน้ำฝนที่มีค่ามากกว่า 1,000 มม.ต่อปี ช่วงขาออก

แบบจำลองได้ เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลในการเปลี่ยนสถานะไม่เพียงพอต่อการสร้างแบบจำลอง

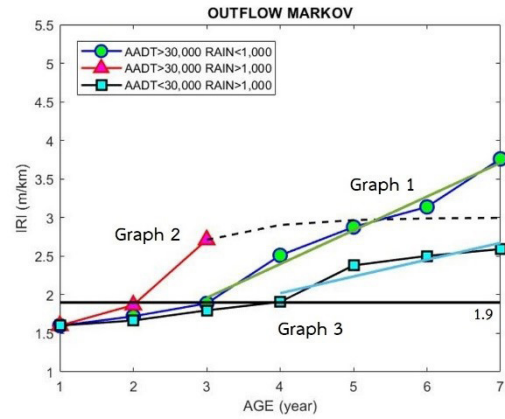
กรณีที่ 1 (กราฟที่ 1 และ 2) มีปริมาณน้ำฝนที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลา 3 ปีแรก แบบจำลองจากปัจจัยที่มีปริมาณน้ำฝนที่มากกว่า มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายมากกว่าแบบจำลองจากปัจจัยที่มีปริมาณน้ำฝนที่น้อยกว่า ในกราฟที่ 2 นั้น หลังจากปีที่ 3 เป็นต้นไป แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกราฟที่ 2 มีค่าหยุดนิ่ง เนื่องจากข้อมูลที่นำมาสร้างในแบบจำลองนั้นมีจำนวนการเปลี่ยนสถานะที่น้อยซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน จึงเป็นเหตุให้ไม่นำมาพิจารณา

กรณีที่ 2 (กราฟที่ 2 และ 3) มีปริมาณจราจรที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่ามีผลลัพธ์เป็นไปตามสมมติฐาน ในส่วนของถนนที่มีปริมาณจราจรที่มากจะส่งผลกระทบต่ออาการเสื่อมสภาพของผิวทางมากกว่าส่วนของถนนที่มีปริมาณจราจรที่น้อยกว่า

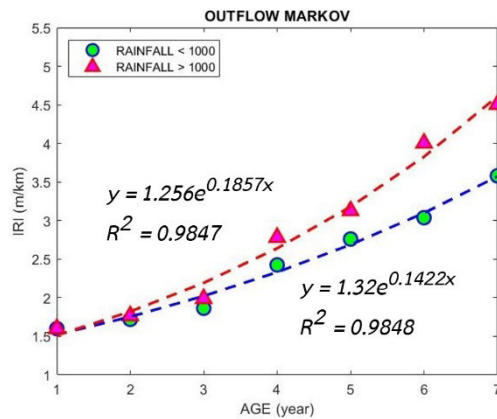
ในรูปที่ 18 หากพิจารณาช่วงของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีค่าไม่เกิน 1.9 เมตรต่อกิโลเมตร จากทั้ง 3 กราฟ จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีความขรุขระสากลมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีค่าเริ่มต้นที่ 1.9 เมตรต่อกิโลเมตรเป็นต้นไปพบว่า ในกราฟที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีที่มีปัจจัยปริมาณจราจรที่มากและมีปริมาณ



รูปที่ 16 แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณน้ำฝน ในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลของเส้นทางขาเข้า



รูปที่ 18 เปรียบเทียบแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยร่วมปริมาณจราจร และปริมาณน้ำฝนเส้นทางขาออก



รูปที่ 17 แบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางจากปัจจัยปริมาณน้ำฝน ในรูปแบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลของเส้นทางขาออก

น้ำฝนที่มาก มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สูงที่สุด โดยพิจารณาจากความชันของกราฟ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน ในส่วนของกรณีที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สูงรองลงมาคือกราฟที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีปัจจัยปริมาณจราจรที่สูง แต่มีปริมาณน้ำฝนน้อย และในกราฟที่ 3 ที่มีปริมาณจราจรที่น้อย แต่มีปริมาณน้ำฝนที่สูงพบว่า เป็นกรณีที่มีปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่น้อยที่สุดอาจกล่าวได้ว่า ปริมาณ

จราจรมีผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์มากกว่าปริมาณน้ำฝน

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลและอายุการใช้งานของถนน โดยพิจารณาพร้อมกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อถนนเกิดความเสียหาย ได้แก่ ปริมาณจราจร ปริมาณน้ำหน้กบรรทุก และปริมาณน้ำฝน โดยนำแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา เพื่อใช้ในการสร้างสมการคาดการณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลในอนาคต จากผลการสร้างแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อถนนเกิดความเสียหาย โดยในส่วนของปัจจัยปริมาณน้ำฝนแสดงให้เห็นถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ปริมาณน้ำฝนที่มากจะส่งผลให้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำฝนที่น้อย และปัจจัยของปริมาณจราจรที่มากก็ส่งผลให้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลมีค่าสูงกว่าปริมาณจราจรที่น้อยกว่าเช่นกัน ในส่วนของกรณีทำการสร้างแบบ



จำลองที่นำทั้งสองปัจจัยมาสร้างแบบจำลองร่วมกันสามารถสร้างได้ แต่มีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะที่น้อยมาก จึงแสดงข้อมูลได้เพียงช่วงปีแรกๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบจำลองโดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ มีแนวโน้มว่าจะสามารถนำแบบจำลองนี้มาพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากล เมื่ออายุผิวทางเพิ่มมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนการซ่อมบำรุงเพื่อให้ถนนมีสภาพการใช้งานที่เหมาะสมกับผู้ใช้งานดังตารางที่ 6 ที่บ่งบอกถึงค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีความสอดคล้องกับความเร็วของผู้ใช้งานบนถนน [13]

ตารางที่ 6 เกณฑ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่เกี่ยวข้องกับความเร็วดังๆ ที่แนะนำโดย Yu และคณะ [13]

Ride Quality Level	IRI Thresholds at Difference Speeds (m/km)					
	20	40	60	80	100	120
Very Good	<5.72	<2.86	<1.90	<1.43	<1.14	<0.95
Good	5.72–8.99	2.86–4.49	1.90–2.99	1.43–2.24	1.14–1.79	0.95–1.49
Fair	9.00–11.39	4.50–5.69	3.00–3.79	2.25–2.84	1.80–2.27	1.50–1.89
Mediocre	11.40–16.16	5.70–8.08	3.80–5.40	2.85–4.05	2.28–3.24	1.90–2.70
Poor	>16.16	>8.08	>5.40	>4.05	>3.24	>2.70

ในอนาคตหากมีข้อมูลที่เพิ่มขึ้นและมากพอสำหรับการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถแสดงผลของแบบจำลองที่สมบูรณ์มากขึ้น รวมถึงวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถใช้สำหรับการวางแผนงบประมาณการซ่อมบำรุง รวมถึงเป็นแนวทางในการพัฒนาหรือต่อยอดงานวิจัยต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และขอขอบคุณกรมทางหลวงและกรมอุตุฯ วิทยาลัยเทคโนโลยี

ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนข้อมูล เพื่อให้ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความเสื่อมสภาพผิวทางแอสฟัลต์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Thamrongkulrat, "Development of work load and routine maintenance cost for asphalt and concrete pavements," Road Research and Development Center, no. RD. 155, 1996.
- [2] Department of Rural Roads, "Pavement distress identification manual," Local Road Maintenance Management System, 2013.
- [3] Department of Rural Roads, "A report summarizing condition pavement by visual inspection rating," Department of Rural Roads, 2012.
- [4] P. Tussawil, "Development of road condition index for an efficient highway maintenance analysis: Case study of flexible pavement maintenance in the eastern region by using HDM-4," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2008 (in Thai).
- [5] W. Subsompon, P. Chinudomsub, J. Ponprasert, and P. Siriakarakornkun, "Development of asphalt pavement deterioration model using IRI in Thailand," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 11, no. 4, pp. 29–35, 2000 (in Thai).
- [6] S. A. Arhin, L. N. Williams, A. Ribbiso, and M. F. Anderson, "Predicting pavement condition index using international roughness index in a dense urban area," *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 10–17, 2015.
- [7] N. Maneedang, B. Kunsuwan, and N. Kunsuwan, "The study and the comparison of the rainfall



- effects on the asphalt concrete surface,” *National Convention on Civil Engineering*, vol. 23, 2018 (in Thai).
- [8] W. Wongweeranimit, “Development of a deterioration model for flexible pavement in low traffic volume roads using markov chains,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2004 (in Thai).
- [9] W. Pocarattananan and W. Subsompon, “Application of deterioration model of flexible pavement in low volume roads using markov chains for pavement maintenance planning,” *Research and Development Journal*, vol. 19, no. 1, 2008.
- [10] S. Surbjakrod, “Development of asphalt concrete pavement deterioration models for Thailand national highways using markov chains,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008 (in Thai).
- [11] X. Chen, Q. Dong, H. Zhu, and B. Huang, “Development of distress condition index of asphalt pavements using LTPP data through structural equation modeling,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 58–69, 2016.
- [12] M. Fakhri and R. S. Dezfoulan, “Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model,” *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 768–780, 2019.
- [13] M. M. Hasan, A. A. Rahman, and R. A. Tarefder, “Investigation of accuracy of pavement mechanistic empirical prediction performance by incorporating level 1 inputs,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 2, pp. 259–268, 2020.
- [14] M. A. Ismail, R. Sadiq, H. R. Soleymani, and S. Tesfamariam, “Developing a road performance index using a Bayesian belief network model,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 348, no. 9, pp. 2539–2555, 2011.
- [15] J. G. Kemeny and J. L. Snell, *Markov chains*. Springer-Verlag, New York, 1976.
- [16] N. Tawanna, F. Takkabut, A. Kesutha, R. Wongsathan, A. Nuangnit, and N. Wongsinlapamorakot, “Improvement performance of PV water pumping system using MPPT-based modified P&O Controller: Modeling, setting experimental package and analysis,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 5–15, 2021 (in Thai).
- [17] N. Koatbua and K. Rungjang, “Choice model for long distance travels by train and application to logit model for lower-northeastern line,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, 2021 (in Thai).
- [18] H.-S. Baik, H. S. Jeong, and D. M. Abraham, “Estimating transition probabilities in markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 132, no. 1, pp. 15–24, 2006.
- [19] A. A. Butt, M. Y. Shahin, K. J. Feighan, and S.H. Carpenter, “Pavement performance prediction model using the Markov process (no. 1123),” *Transportation Research Record*, 1987.
- [20] Ratchaburi Rural Road Office. (2013). Report the Operation Progress 2013–2018. Ratchaburi Rural Road Office. Ratchaburi, Thailand



[Online]. Available: <https://ratchaburi.drr.go.th/>
[21] N. Maneedang, N. Maneedang, B. Kunsuwan, and N. Kunsuwan, "Study and comparison

of physical factors effecting on asphalt road surface," *National Convention on Civil Engineering*, vol. 24, 2017 (in Thai).