



## บทที่ 4

### การพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทาง

ในการศึกษานี้เป็นการนำกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟซึ่งเป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ในอนาคตจากการวิเคราะห์เหตุการณ์ในปัจจุบันมาใช้ในการทำนายสภาพในอนาคตของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟเป็นเครื่องมือทางการจัดการทางสถิติ มีการนำเทคนิคนี้ไปช่วยในการตัดสินใจหลายๆเรื่อง เช่น เพื่อการวิเคราะห์สัดส่วนทางการตลาด เพื่อวิเคราะห์จำนวนประชากร และเพื่อพยากรณ์เกี่ยวกับโอกาสที่เครื่องจักรจะเสียในอนาคต จะเห็นได้ว่ากระบวนการมาร์คอฟสามารถวิเคราะห์ได้ลึกและครอบคลุมในหลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาแบบจำลองที่มีข้อจำกัดของข้อมูลในอดีต เนื่องจากข้อมูลความเสียหายของทางไม่ได้มีการเก็บสำรวจอย่างต่อเนื่อง ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากลเป็นตัวแทนสภาพความเสียหายของผิวทาง ร่วมกับปัจจัยทางด้านอายุของทาง ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี และความเสียหายรอยแตกผิวทาง หลุมบ่อ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของผิวทาง โดยใช้วิธีกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟซึ่ง

#### 4.1 ขั้นตอนพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ

การพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางโดยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- (1) จัดกลุ่มข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลตามปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทางในลักษณะต่างๆ
- (2) กำหนดเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและหาเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ
- (3) คำนวณค่าสถานะสภาพของผิวทางที่เวลาต่างๆ

##### 4.1.1 การจัดกลุ่มข้อมูล

แบบจำลองกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟเป็นแบบจำลองในเชิงสถิติที่มีเอกลักษณ์เฉพาะ เนื่องจากแบบจำลองเชิงสถิติจะอยู่ภายใต้กฎหลักสำคัญ 3 ประการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสภาพสายทางได้ดังนี้ (Shahin et.al., 1987)

- กระบวนการเชิงสถิติเป็นกระบวนการที่พิจารณาช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง ถึงแม้การเชื่อมสภาพของทางเป็นกระบวนการต่อเนื่อง แต่สามารถพิจารณาแยกเป็นช่วงเวลาได้เมื่อพิจารณา ณ เวลาใดๆ
- กระบวนการเชิงสถิติ พิจารณาภายใต้สถานะที่สามารถนับได้และมีจุดสิ้นสุด ซึ่งในความเป็นจริง การเชื่อมสภาพของทางมีจำนวนที่ไม่สิ้นสุด หากแต่สามารถกำหนดช่วงเวลาที่สนใจ และพิจารณาสถานะเป็นกลุ่มที่อยู่ภายในขอบเขตใดๆได้
- กระบวนการทางสถิติที่เป็นหลักของมาร์คอฟ สามารถทำนายสภาพในอนาคตได้จากสถานะในปัจจุบัน หากพิจารณาในสถานะของทางคือการพิจารณาต่อช่วงเวลาใดๆ หรือ 1 ปี ดังนั้นการจัดกลุ่มข้อมูลภายใน 1 ปี คือข้อมูลปัจจุบันที่สามารถทำนายอนาคตได้

การพิจารณาสภาพสายทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ เป็นการพิจารณาพฤติกรรมของทางในเชิงเอกพันธ์ สายทางที่มีพฤติกรรมเหมือนกัน จะมีการเชื่อมสภาพผิวทางเหมือนกัน ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ ต้องแบ่งกลุ่มข้อมูลสภาพสายทางตามปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเชื่อมสภาพผิวทาง ซึ่งจากการวิจัยในอดีตสามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเชื่อมสภาพผิวทางได้ 5 ปัจจัย ดังนี้ 1) ความแข็งแรงของโครงสร้างทาง 2) ปริมาณการจราจร 3) สภาพแวดล้อม 4) ความเสียหายผิวทาง และ 5) การก่อสร้าง

#### 1) การจัดกลุ่มตามความแข็งแรงโครงสร้างทาง

สามารถแบ่งตามมาตรฐานชั้นทางของกรมทางหลวงเนื่องจากข้อมูลสายทางทั้ง ความหนาและค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของชั้นทางต่างๆ มีลักษณะที่เป็นรูปแบบโดยสามารถแบ่งตามมาตรฐานชั้นทางของกรมทางหลวง ดังอธิบายไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งแบ่งชั้นประเภทชั้นทางออกเป็น 4 ประเภทตามปริมาณการจราจร ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งในการวิจัยนี้ไม่นำสายทางที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีต่ำกว่า 300 คัน/วันมาใช้ เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นสายทางชนิดผิวทางลูกรัง

#### 2) การจัดกลุ่มตามปริมาณการจราจร

ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีมีผลกระทบต่อการเชื่อมสภาพ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อชั้นทางมีขนาดแตกต่างกันตามปริมาณการจราจร ชนิดของยานพาหนะ และพฤติกรรมในการใช้ทางของยานพาหนะแต่ละชนิด ซึ่งในการวิจัยแบ่งปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีออกเป็น 5 ช่วงตามมาตรฐานชั้นทางของกรมทางหลวง (ภาคผนวก ก) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แบ่งกลุ่มสายทางด้วยความแข็งแรงโครงสร้างทาง (ภาคผนวก ก)

ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (คัน/วัน)	ประเภทผิวทาง	ความแข็งแรงทางโครงสร้าง
> 8,000	ชั้นสูง	แข็งแรงมาก
2,000 – 8,000	ชั้นสูง	แข็งแรงปานกลาง
300 – 2,000	กลางถึงสูง	ต่ำ
≤ 300	ลูกรัง	ต่ำ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีตามมาตรฐานชั้นทางสำหรับทางหลวง

มาตรฐานชั้นทาง	ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (คัน/วัน)
พิเศษ	> 8,000
1	4,000 – 8,000
2	2,000 – 4,000
3	1,000 – 2,000
4	300 – 1,000
-	< 300

### 3) การจัดกลุ่มตามสภาพความเสียหายผิวทาง

ปัจจัยทางด้านความเสียหายในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความเสียหายหลุม บ่อ ความเสียหายรอยแตก และไม่มี ความเสียหาย เพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยใน ระดับต่างๆที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ

#### 4) การจัดกลุ่มตามสภาพแวดล้อมและการก่อสร้าง

สภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของทางที่สำคัญมีอยู่ 3 ประการคือ ความลาดชันของภูมิประเทศ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อเดือนตลอดปี และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน 1 วัน เนื่องจาก การเกิดรอยแตกผิวทางนอกจากจะมีสาเหตุมาจากปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีแล้ว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหนึ่งวันเป็นสาเหตุให้เกิดการหดหรือขยายตัวของชั้นทาง หากสายทางมีการหดและขยายตัวมาก ๆ เป็นเวลานาน อาจทำให้ทางเกิดรอยแตกได้ (Zuo et. al., 2007)

เมื่อสายทางเกิดรอยแตกเป็นสาเหตุให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่ชั้นทางและสร้างความเสียหายแก่ชั้นทางได้ แต่หากในพื้นที่ตั้งของสายทางนั้นมีปริมาณน้ำฝนน้อย หรือสายทางมีความสามารถในการระบายน้ำสูง ผลกระทบต่อความแข็งแรงโครงสร้างจะน้อยลง ดังนั้น มุมมองปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพทาง สามารถจัดกลุ่มอยู่ในรูปแบบของภูมิภาคได้ เนื่องจากแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยมีการแบ่งลักษณะปริมาณน้ำฝนกันอย่างชัดเจน ดังเช่นตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 สถิติอุณหภูมิของประเทศไทยในฤดูการต่างๆ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2551)

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
เหนือ	23.4	28.2	27.2
ตะวันออกเฉียงเหนือ	24	28.4	27.7
กลาง	26.1	29.5	28.2
ตะวันออก	26.4	28.9	28
ใต้ฝั่งตะวันออก	26.1	28.1	27.8
ใต้ฝั่งตะวันตก	26.8	28.4	27.3

การจัดกลุ่มตามการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทางสามารถจำแนกตามภูมิภาคได้ดังตารางที่ 4.5 โดยมีสมมติฐานว่าสายทางที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน มีพฤติกรรมการเสื่อมสภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกัน เพื่อพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำฝน (มม.) ของประเทศไทยในฤดูต่างๆ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2551)

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	จำนวนวันฝนตกตลอดปี
เหนือ	104.6	166.5	955.2	123
ตะวันออกเฉียงเหนือ	72.8	211.1	1,111.90	117
กลาง	130	192.3	907.4	113
ตะวันออก	201.3	257.8	1,440.20	131
ใต้ฝั่งตะวันออก	819.9	197.9	661.2	148
ใต้ฝั่งตะวันตก	429.5	380	1,914.70	176

ตารางที่ 4.5 สรุปกลุ่มสายทางตามพฤติกรรมการเสื่อมสภาพผิวทาง

ความแข็งแรง โครงสร้าง	ปริมาณการจราจรเฉลี่ย ต่อวันตลอดปี (คัน/วัน)	สภาพความเสียหายผิวทาง		
		ไม่มีความ เสียหาย	รอยแตก	หลุมบ่อ
แข็งแรงมาก	> 8,000	827	128	20
แข็งแรงปานกลาง	4,000 - 8,000	834	124	62
	2,000 - 4,000	592	205	141
แข็งแรงต่ำ	1,000 - 2,000	558	179	127
	300 - 1,000	204	78	134

#### 4.1.2 การสร้างเมทริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนสถานะ

การทำนายสภาพการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟในการวิจัยนี้ใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากลเป็นตัวแทนสภาพผิวทาง ซึ่งใช้หลักการทำนายสภาพสถานะของทางในอนาคตด้วยข้อมูลสภาพสถานะของผิวทางในปัจจุบัน เนื่องจากข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลเป็นข้อมูลลักษณะเชิงปริมาณ จึงต้องจัดข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรเชิงกลุ่ม โดยการแบ่งกลุ่มตามระดับความขรุขระดังที่กรมทางหลวงมีการจำแนกไว้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ลักษณะสภาพผิวทางของค่าดัชนีความขรุขระสากลที่กำหนดโดยกรมทางหลวง

ค่าดัชนีความขรุขระสากล (ม./กม.)	ลักษณะสภาพผิวทาง
0 – 3	เรียบ
3 – 4	ขรุขระน้อย
4 – 5	ขรุขระปานกลาง
> 5	ขรุขระมาก

จากข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลจากกรมทางหลวง สภาพความขรุขระของผิวทางเมื่อได้รับการบูรณะเสริมผิวทางใหม่ มีค่าดัชนีความขรุขระสากลเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1.80 - 2.20 ม./กม. ซึ่งจากข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมดของงานวิจัยนี้ เมื่อนำค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางสร้างใหม่ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าค่าเฉลี่ยค่าดัชนีขรุขระสากลของสายทางสร้างใหม่มีค่าเท่ากับ 2.10 ดังนั้นการกำหนดค่าดัชนีความขรุขระสากลให้เป็นตัวแปรเชิงกลุ่มจะแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม โดยจะเปลี่ยนช่วงค่าดัชนีความขรุขระสากลเดิม จากช่วงสภาพผิวทางเรียบ (0 – 3 ม./กม.) เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สร้างใหม่หรือได้รับการบูรณะเสริมผิวทางใหม่เป็นช่วงค่าดัชนีค่าความขรุขระสากลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.20 ม./กม. และ ช่วง 2.20 – 3.00 ม./กม. นอกจากนี้ เพื่อความเหมาะสมต่อข้อมูลตามสถานะสภาพของผิวทาง จึงเพิ่มช่วง 5.00 - 6.00 ม./กม. และช่วงมากกว่า 6.00 ม./กม. แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สถานะสภาพของผิวทางที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลต่างๆ

ค่าดัชนีความขรุขระสากล (ม./กม.)	สถานะสภาพของผิวทาง
$\leq 2.20$	A
2.20 – 3.00	B
3.00 – 4.00	C
4.00 – 5.00	D
5.00 – 6.00	E
$> 6.00$	F

จากลักษณะข้อมูลดังกล่าวสามารถสร้างเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะสภาพ  $n_{ij}$  ที่แบ่งค่าดัชนีความขรุขระสากล ออกเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มขนาด  $6 \times 6$  ดังนี้

$$n_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} & n_{16} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} & n_{26} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} & n_{35} & n_{36} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} & n_{45} & n_{46} \\ n_{51} & n_{52} & n_{53} & n_{54} & n_{55} & n_{56} \\ n_{61} & n_{62} & n_{63} & n_{64} & n_{65} & n_{66} \end{bmatrix}$$

จากเมทริกซ์  $n$  ดังกล่าว จำนวนข้อมูลที่เปลี่ยนสถานะสภาพ  $n_{21}, n_{31}, n_{32}, n_{41}, n_{42}, n_{43}, n_{51}, n_{52}, n_{53}, n_{54}, n_{61}, n_{62}, n_{63}, n_{64}$  และ  $n_{65}$  มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลที่นำมาพัฒนาแบบจำลองนั้นจะเป็นข้อมูลของสายทางที่ไม่มีการซ่อมบำรุงคือ ค่าดัชนีความขรุขระสากลจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของทางเพิ่มขึ้น ทำให้ได้เมทริกซ์จำนวนข้อมูล  $n_{ij}$  ดังนี้

$$n_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} & n_{16} \\ 0 & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} & n_{26} \\ 0 & 0 & n_{33} & n_{34} & n_{35} & n_{36} \\ 0 & 0 & 0 & n_{44} & n_{45} & n_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n_{55} & n_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n_{66} \end{bmatrix}$$

การคำนวณหาเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ จะเปลี่ยนตาม เมทริกซ์ การเปลี่ยนสถานะของค่าดัชนีความขรุขระสากล และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ ( $P_{66}$ ) จากสถานะสภาพ ( $n_{i=6}$ ) ไปสถานะสภาพ ( $n_{j=6}$ ) มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจาก ข้อมูล  $n_{66}$  อยู่ช่วง สถานะที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลมากกว่า 6.00 ดังตัวอย่างสายทางผิวทางลาดยางกลุ่มที่ไม่มี ความเสียหายและมีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีอยู่ระหว่าง 300-1,000 คัน/วัน ในเขต พื้นที่ภาคเหนือ โดยใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากลเริ่มต้นเท่ากับ 2.10 ม./กม. เวกเตอร์สถานะเริ่มต้น ( $v^{(0)}$ ) คือ [1 0 0 0 0 0] เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยน สถานะ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

ลักษณะ	เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ ( $n$ )	เมทริกซ์ความน่าจะเป็น ของการเปลี่ยนสถานะ ( $P^t$ )
ภาคเหนือ AADT 300-1,000 ไม่มีความเสียหาย	$\begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 44 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 75 & 26 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 11 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.6 & 0.4 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.7 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.6 & 0.4 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.8 & 0.3 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{pmatrix}$

#### 4.1.3 การหาสถานะของทาง ณ เวลาใดๆ

เมื่อได้ค่าเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ ( $n$ ) และเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยน สถานะ ( $P^t$ ) แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าเวกเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง ( $v$ ) ซึ่งบ่ง บอกความน่าจะเป็นของสภาพสถานะ ณ ช่วงเวลาต่างๆ เนื่องด้วยทฤษฎีมาร์คอฟพิจารณาให้ ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะคงที่เสมอ ดังนั้นเมื่อสร้างเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการ เปลี่ยนสถานะได้แล้ว จึงทำนายเวกเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง ณ เวลาต่างๆ ( $v^{(k)}$ ) ดังสมการ

$$v^{(t)} = v^{(0)}P^t$$

โดย

$$v^{(t)} = \text{เวกเตอร์ความน่าจะเป็นแสดงสถานะสภาพของผิวทาง ณ เวลา } t$$

$$v^{(0)} = \text{เวกเตอร์สถานะเริ่มต้น}$$



$P^i$  = แมตริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนสถานะสภาพ

ดังตัวอย่างสายทางกลุ่มที่ไม่มีความเสียหายและมีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี อยู่ในช่วง 300 - 1,000 คัน/วัน มีอายุการใช้งานได้ 3 ปี เมื่อใช้กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟสามารถทำนายสภาพสถานะผิวทางได้  $v^{(3)} = [0.13 \ 0.49 \ 0.34 \ 0.05 \ 0.00 \ 0.00]$  มีความหมายว่า เมื่อสายทางที่ไม่มีความเสียหายและมีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีอยู่ในช่วง 300-1,000 คัน/วัน/ปี ใช้งานไปได้ 3 ปี มีความเป็นไปได้ที่สภาพผิวทางจะมีค่าดัชนีความขรุขระสากลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.20 อยู่ 0.13 และมีความเป็นไปได้ที่สภาพผิวทางจะมีค่า IRI มากกว่า 2.20 แต่ไม่เกิน 3.00 อยู่ 0.49 เป็นต้น ตามลำดับทุกช่วงสถานะดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างความน่าจะเป็นสถานะของสายทาง ณ อายุการใช้งาน 3 ปี

ค่าดัชนีความขรุขระสากล (ม./กม.)	ความน่าจะเป็นของสถานะสายทาง
$\leq 2.20$	0.13
2.20 – 3.00	0.49
3.00 – 4.00	0.34
4.00 – 5.00	0.05
5.00 – 6.00	0.00
$> 6.00$	0.00

เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นของสถานะสภาพของผิวทาง ( $v^i$ ) ที่ได้เป็นตัวแปรเชิงกลุ่มของค่าดัชนีความขรุขระสากล จึงต้องแปลงค่าสถานะสภาพของผิวทางที่ระยะเวลาต่างๆ ให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ โดยแปลงค่าความน่าจะเป็นของสภาพผิวทางให้อยู่ในรูปแบบของค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยสมการ

$$PCS(t) = v^i \times CSV$$

โดย  $PCS(t)$  = สถานะสภาพโดยเฉลี่ยของผิวทาง ณ เวลา  $t$

$v^t$  = เวกเตอร์ความน่าจะเป็นแสดงสถานะสภาพของผิวทาง ณ เวลา  $t$

CSV = เวกเตอร์สถานะสภาพผกผัน

ดังตัวอย่างสายทางกลุ่มที่ไม่มีความเสียหายและมีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี อยู่ในช่วง 300 - 1,000 คัน/วัน มีอายุการใช้งานได้ 3 ปี มีสภาพสถานะผิวทางได้  $v^{(3)} = [0.13 \ 0.49 \ 0.34 \ 0.05 \ 0.00 \ 0.00]$  และเวกเตอร์สถานะสภาพผกผัน (CSV) ซึ่งเป็นค่ากลางของแต่ละช่วงสถานะ =  $[2.10 \ 2.60 \ 3.50 \ 4.50 \ 5.50 \ 6.50]$  สามารถทำนายสภาพผิวทางได้ดังตารางที่ 4.10 และสามารถแสดงพฤติกรรมของทางได้ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.10 เวกเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง และค่าดัชนีความขรุขระสากล ณ เวลาต่างๆ

อายุใช้งาน	$v^{(k)}$	IRI <sub>(k)</sub> (ม./กม.)
0	[ 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 ]	2.10
1	[ 0.500 0.500 0.000 0.000 0.000 0.000 ]	2.35
2	[ 0.025 0.569 0.181 0.000 0.000 0.000 ]	2.64
3	[ 0.125 0.488 0.339 0.046 0.002 0.000 ]	2.94
4	[ 0.063 0.374 0.426 0.116 0.021 0.000 ]	3.24
5	[ 0.031 0.269 0.449 0.184 0.061 0.006 ]	3.54
6	[ 0.016 0.187 0.428 0.233 0.115 0.021 ]	3.83
7	[ 0.008 0.127 0.382 0.260 0.173 0.050 ]	4.13

การพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของสายทาง ( $P^t$ ) ทั้ง 19 กลุ่ม ดังตารางที่ ข-1 ถึง ข-4 ในภาคผนวก ข เพื่อใช้ในการทำนายสภาพผิวทาง ณ เวลาต่างๆ ด้วยสมการดังนี้

$$v^{(t)} = v^{(0)} P^t$$

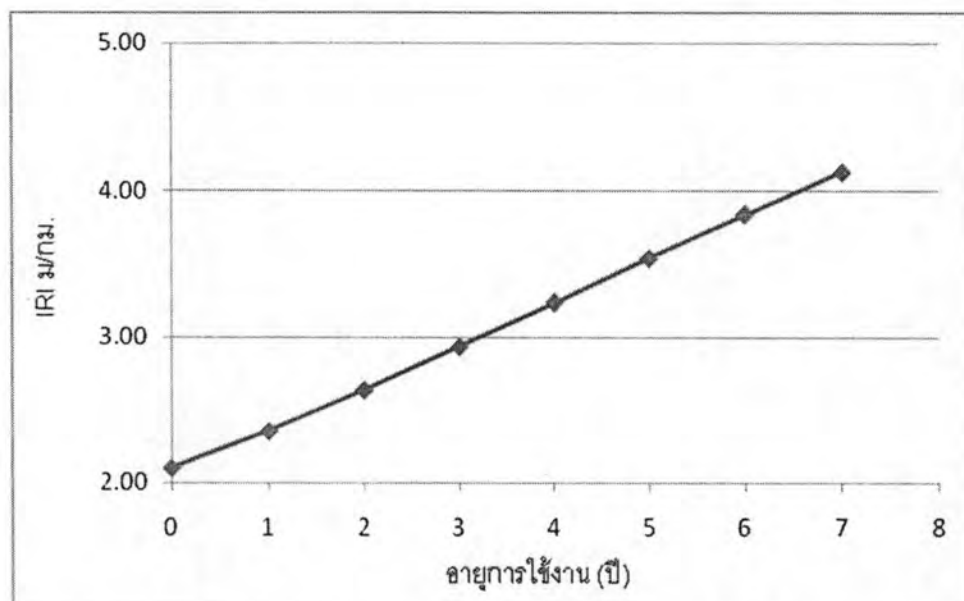
$$PCS(t) = v^{(t)} \times CSV$$

โดย  $PCS(t)$  = สถานะสภาพโดยเฉลี่ยของผิวทาง ณ เวลา  $t$

$CSV$  = เวกเตอร์สถานะสภาพผกผัน

$v^{(t)}$  = เวกเตอร์ความน่าจะเป็นแสดงสถานะสภาพของผิวทาง ณ เวลา  $t$

$Pt$  = แมทริกซ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนสถานะสภาพ



รูปที่ 4.1 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ระยะเวลาต่างๆ ของสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ตลอดปีอยู่ระหว่าง 300-1,000 คัน/วัน ในเขตพื้นที่ภาคเหนือ

#### 4.2 แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพของผิวทาง

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยข้อมูลสายทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมดสามารถพัฒนาแบบจำลองได้ทั้งหมด 19 แบบจำลอง ดังในตารางที่ 4.11 โดยแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะแสดงไว้ใน ตารางที่ ข-1 ถึง ข-4 ในภาคผนวก ข

สายทางบางกลุ่มไม่สามารถใช้ข้อมูลสภาพทางที่มีอยู่ในปัจจุบันพัฒนาแบบจำลองได้ เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอหรือข้อมูลไม่สามารถแสดงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะได้ทุก ช่วงสถานะ ตัวอย่างเช่น กลุ่มสายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากการสร้างแมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ แสดง ดังตารางที่ 4.12 พบว่าไม่มีข้อมูลสายทางในช่วงที่มีค่าความขรุขระสากลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.20

ตารางที่ 4.11 สรุปจำนวนข้อมูลและกลุ่มแบบจำลองที่สามารถพัฒนาได้จากข้อมูล

ความ แข็งแรง โครงสร้าง	ปริมาณ การจราจรเฉลี่ย ต่อวันตลอดปี (คัน/วัน)	จำนวนข้อมูล (กิโลเมตร)					
		ภาคเหนือ			ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		
		ไม่มีความ เสียหาย	รอย แตก	หลุม บ่อ	ไม่มีความ เสียหาย	รอย แตก	หลุม บ่อ
แข็งแรงต่ำ	300-1,000	79	-	-	-	-	-
	1,000-2,000	237	105	72	93	49	53
แข็งแรงปาน กลาง	2,000-4,000	245	62	77	136	76	64
	4,000-8,000	163	74	62	93	-	-
แข็งแรงสูง	≥ 8,000	59	70	-	-	-	-

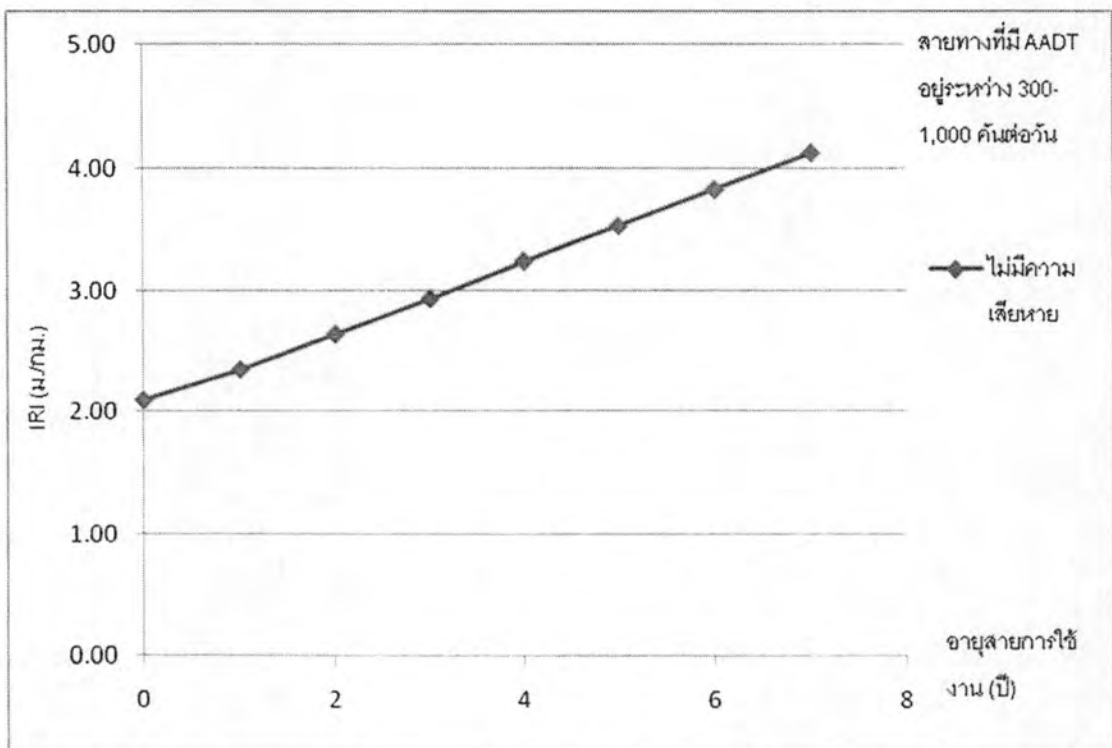
ม./กม. และข้อมูลค่าความขรุขระสากลที่มีค่ามากกว่า 5.00 ม./กม. เป็นต้นไป ดังนั้นแบบจำลองทำนายสภาพผิวทางจึงไม่สามารถทำนายสภาพสายทางที่มีค่าความขรุขระสากลน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.20 ม./กม. และสายทางที่มีค่าความขรุขระสากลมากกว่า 4.00 ม./กม. ได้

แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ ต้องอาศัยข้อมูลสภาพสายทางในปัจจุบันที่ครอบคลุมสภาพสายทางทั้งหมดตั้งแต่เริ่มสร้างจวบจนถึงระดับสภาพผิวทางที่สามารถยอมรับได้ เพื่อให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่สมบูรณ์ที่สุด หากข้อมูลที่นำมาพัฒนาแบบจำลองมีไม่เพียงพอ เมื่อนำมาจัดกลุ่มตามปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของทาง ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ และสร้างแบบจำลองขึ้นมาได้ เช่น กลุ่มของสายทางที่มีเฉพาะความเสียหายรอยแตกผิวทางในช่วงปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300-1,000 คัน/วัน และกลุ่มของสายทางที่มีเฉพาะความเสียหายหลุมบ่อที่เกิดจากรอยแตก ในช่วงปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300-1,000 คัน/วัน และช่วงที่มากกว่า 8,000 คัน/วัน

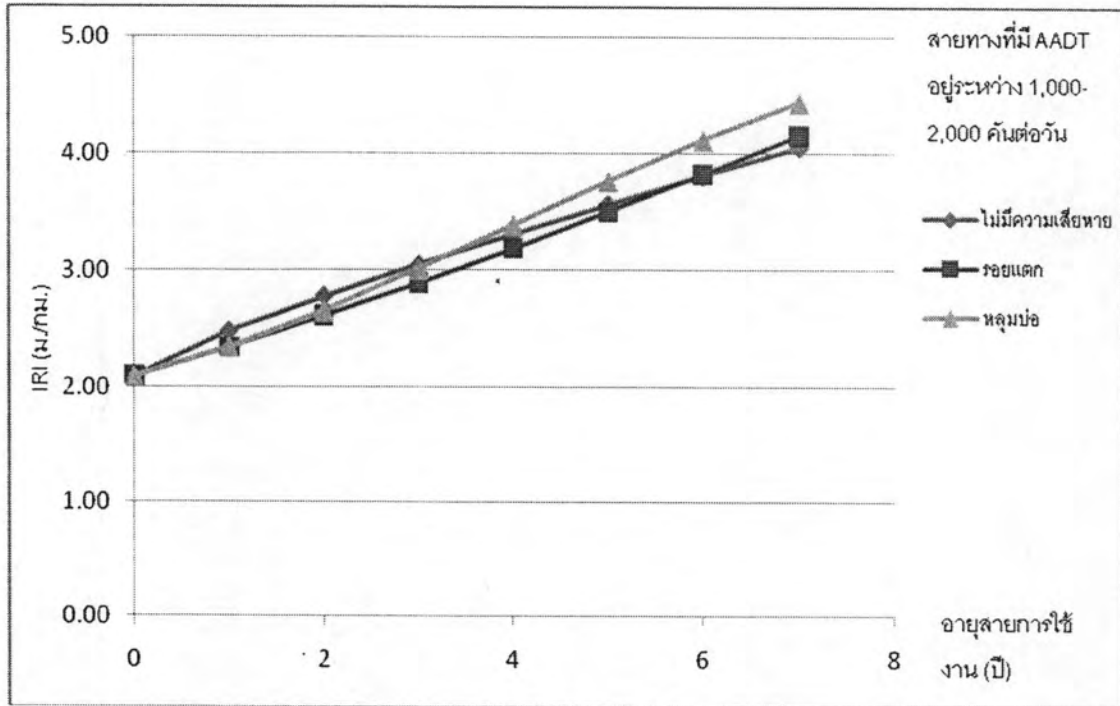
ตารางที่ 4.12 เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะและเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของสายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ลักษณะ	เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ	เมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ
ภาคเหนือ AADT 300-1,000 ไม่มีความเสียหาย	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18 & 7 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 8 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.47 & 0.53 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.67 & 0.26 & 0.07 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.29 & 0.57 & 0.14 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}$

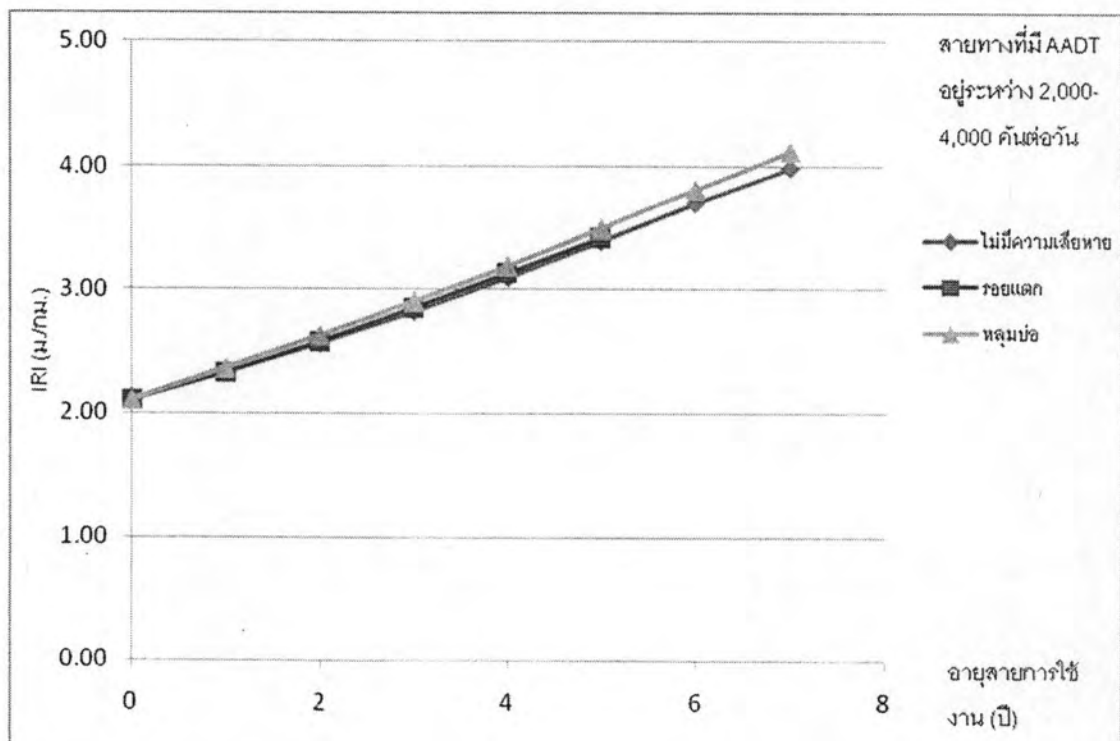
ดังนั้น แบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่พัฒนาได้ มีจำนวนทั้งสิ้น 19 แบบจำลอง โดยเมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ และแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยตัวอย่างแบบจำลองที่พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทาง แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.9



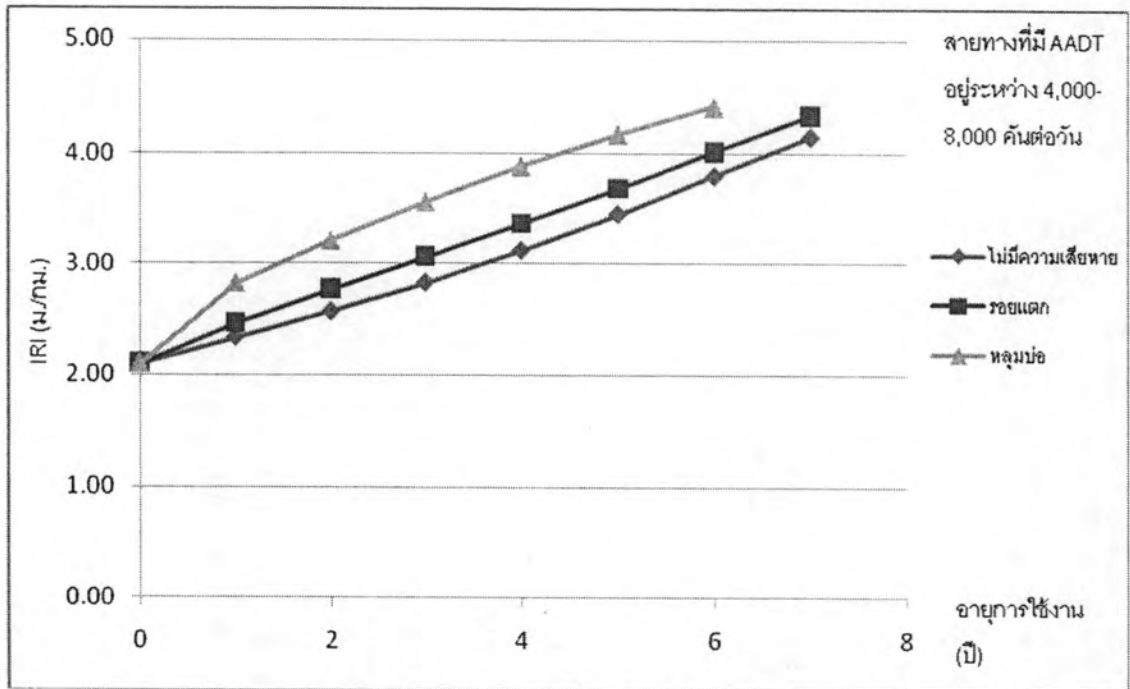
รูปที่ 4.2 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 คัน/วัน



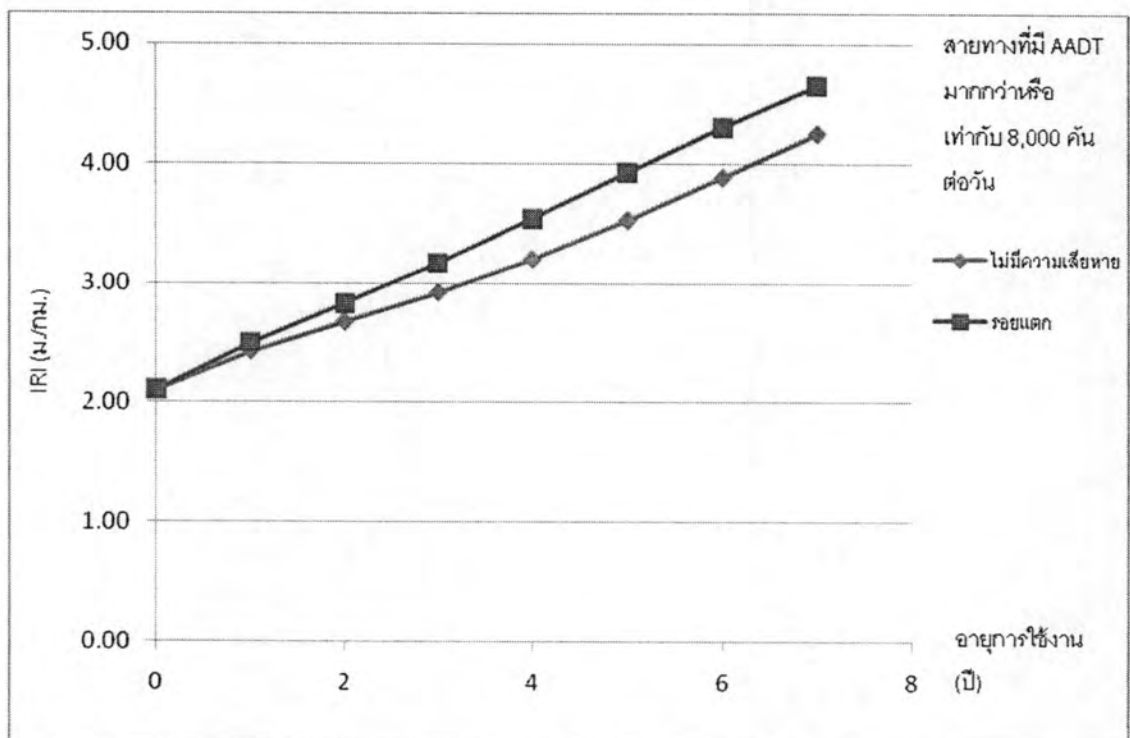
รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ตลอดปี 1,000 - 2,000 คัน/วัน



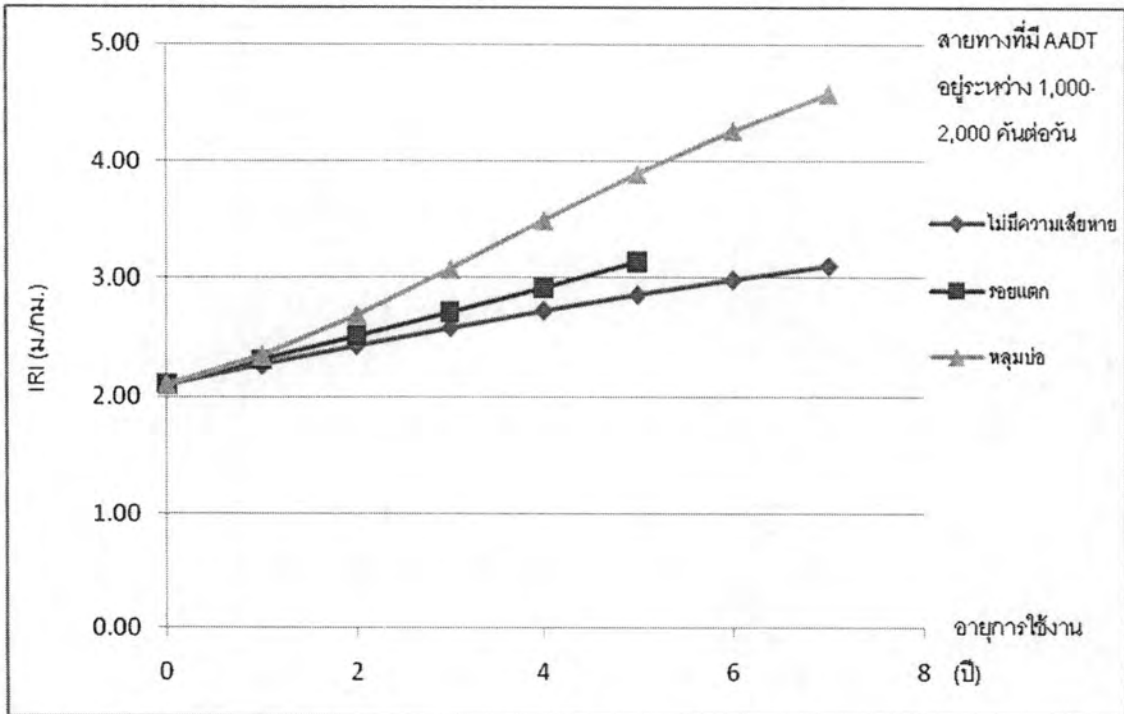
รูปที่ 4.4 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ตลอดปี 2,000 - 4,000 คัน/วัน



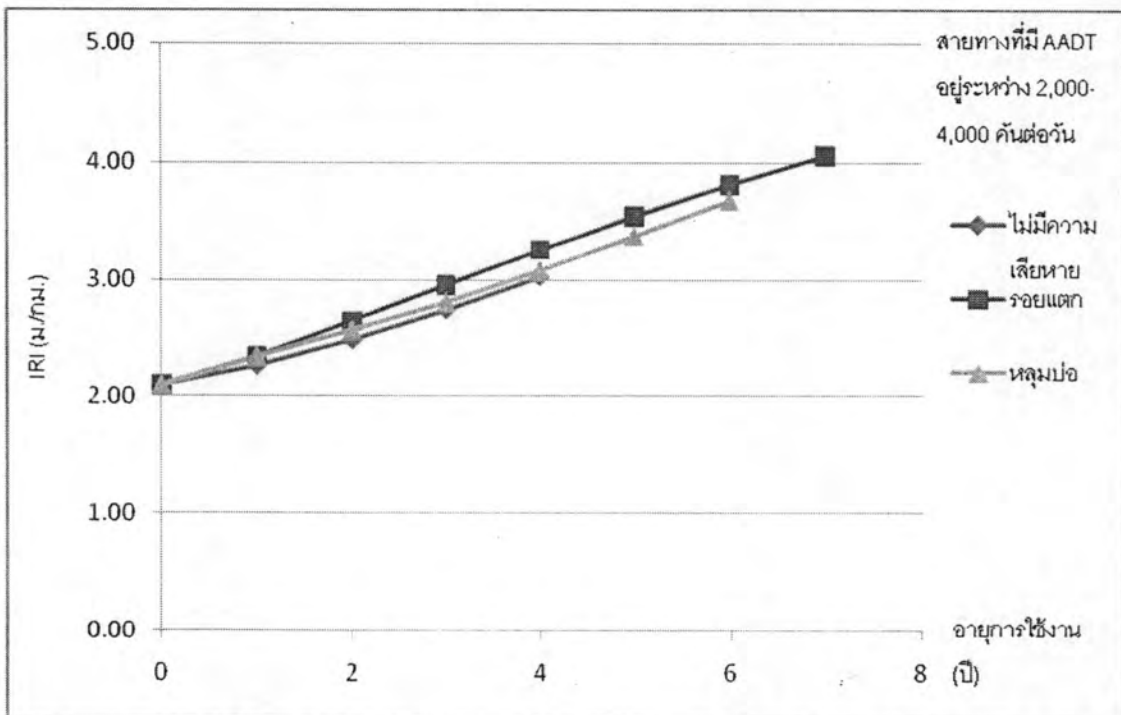
รูปที่ 4.5 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ตลอดปี 4,000 - 8,000 คัน/วัน



รูปที่ 4.6 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน ตลอดปี  $\geq 8,000$  คัน/วัน

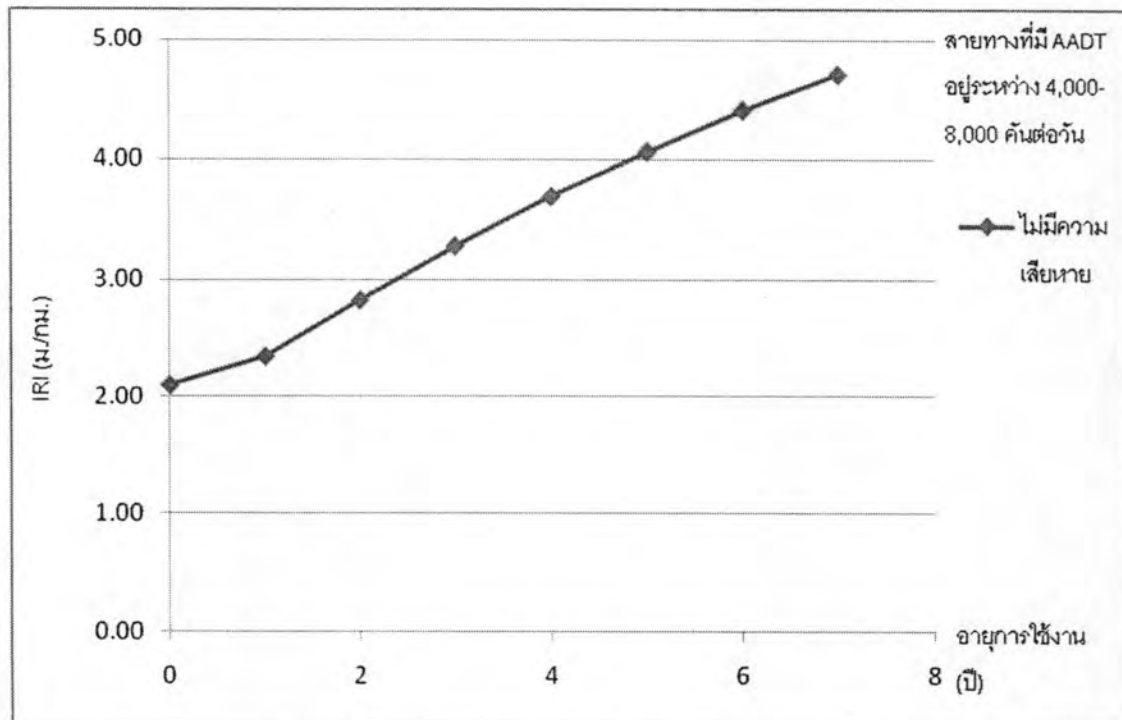


รูปที่ 4.7 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 1,000 - 2,000 คัน/วัน



รูปที่ 4.8 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000 - 4,000 คัน/วัน





รูปที่ 4.9 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000 - 8,000 คัน/วัน

#### 4.3 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระที่ได้จากการสำรวจหน้างานกับค่าดัชนีความขรุขระในช่วงเวลาเดียวกันที่ได้มาจากการทำนายด้วยแบบจำลองของงานวิจัยนี้ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด และส่วนที่สองคือการเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือระหว่างแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้กับแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิระชัย (2547)

##### 4.3.1 การทดสอบความสัมพันธ์

การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่พัฒนาโดยวิธีกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ สามารถทำได้โดยหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจริงที่สำรวจหน้างานกับค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ได้จากการทำนาย ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันสูง โดยใช้สมการที่ 4.1 ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{est_i} - Y_{obs_i})^2}{\sum(Y_{obs_i} - Y_m)^2} \quad \dots 4.1$$

โดยที่  $R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

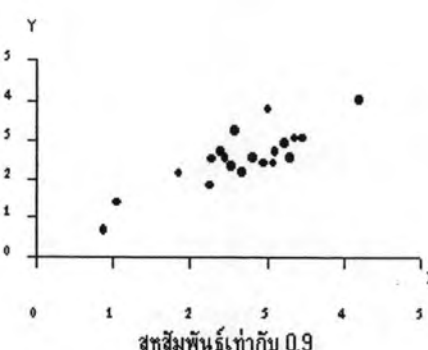
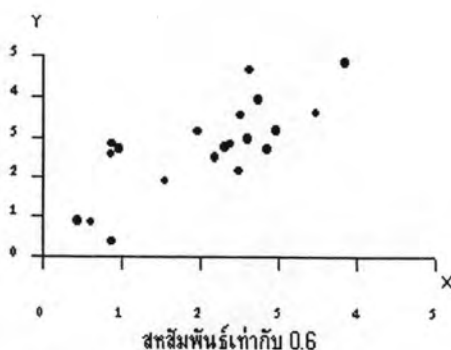
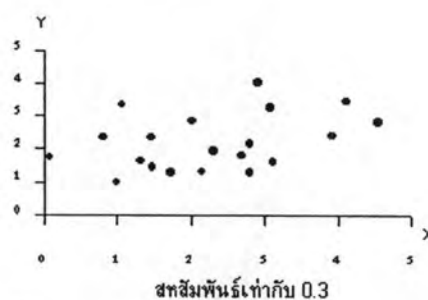
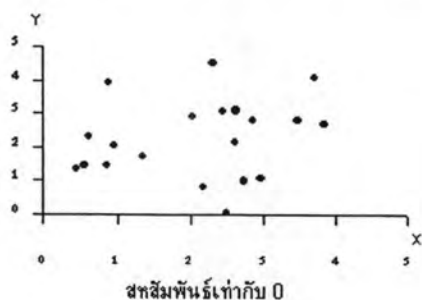
$Yest_i$  = ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่พยากรณ์ได้โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

$Yobs_i$  = ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สำรวจและเก็บรวบรวมจริง

$Ym$  = ค่าเฉลี่ยความขรุขระสากลที่สำรวจและเก็บรวบรวมจริง

การหาค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ใช้สัญลักษณ์  $R^2$  ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรเป็นไปในทิศทางเดียวกันและความใกล้เคียงเท่าไร โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ดังรูปที่ 4.10

- ถ้า  $R^2$  มีค่าสูง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกันมาก มีความสัมพันธ์กันสูง
- ถ้า  $R^2$  มีค่าต่ำ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรมีความใกล้เคียงกันน้อย มีความสัมพันธ์กันต่ำ
- ถ้า  $R^2$  มีค่าเป็น 0 แสดงว่าตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน



รูปที่ 4.10 การกระจายของข้อมูล 4 ชุดที่มีค่ากลางและการกระจายเหมือนกันแต่ระดับความสัมพันธ์ต่างกัน

การวิเคราะห์แบบจำลองที่พัฒนาว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) แบบจำลองยิ่งที่มีค่า  $R^2$  ใกล้ 1 แสดงว่าผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกับสภาพหน้างานจริงมีความสัมพันธ์ต่อกันมาก สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระสากลได้ใกล้เคียงความเป็นจริง โดยข้อมูลสายทางที่นำมาทดสอบความน่าเชื่อถือแบบจำลองของวิจัยนี้ใช้สายทางที่สำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลในปี พ.ศ.2544, พ.ศ. 2546 - 2548 และ พ.ศ. 2550 ที่มีข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทาง (ความเสียหาย ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี และสภาพแวดล้อม) ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลองที่พิจารณาปัจจัยทางด้านชนิดผิวทางกับปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี โดยวิธีกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟกับดัชนีค่าความขรุขระสากลจริงในปี พ.ศ.2551 แสดงดังตารางที่ 4.13 ด้วยข้อมูลสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000 – 8,000 คัน/วัน และมีความเสียหายหลุมบ่อ

ตารางที่ 4.13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลองโดยวิธีกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟกับค่าดัชนีความขรุขระสากลจริงในปี พ.ศ.2551

หมายเลขสายทาง	หมายเลขควบคุม	กิโลเมตรเริ่มต้น	กิโลเมตรปลาย	IRI พ.ศ. 2550	Yobs, ม./กม. (IRI จริง)	Yest, ม./กม. (IRI มาร์คอฟ)
1009	0100	0+000	1+000	2.55	3.00	3.06
1010	0100	0+000	1+000	3.39	4.93	3.73
1045	0201	20+000	21+000	1.92	2.21	2.73
1067	0100	15+000	16+000	2.21	2.57	2.88
1084	0300	46+000	45+000	2.16	2.34	2.85
1084	0400	33+000	32+000	2.60	2.84	3.09
1089	0100	3+000	4+000	2.39	2.50	2.97
•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•
1202	0100	26+000	27+000	2.20	2.56	2.88

เนื่องจากข้อมูลที่มีจำกัดและการพัฒนาแบบจำลองใช้ข้อมูลสภาพทางในปี พ.ศ. 2550 ในการพัฒนา ดังนั้นการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง จึงใช้ข้อมูลสภาพสายทางในปี พ.ศ. 2544 พ.ศ. 2546-2548 และ พ.ศ. 2550 ที่มีข้อมูลปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพทางครบถ้วนทั้ง 5 ประเภท ในการทดสอบความน่าเชื่อถือ โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.14 พบว่าแบบจำลองทำนาย

ตารางที่ 4.14 สรุปความน่าเชื่อถือแบบจำลองที่พัฒนากับค่าดัชนีความขรุขระสากลจริง

ภูมิภาค	ความเสียหาย	ปริมาณการจราจร	R <sup>2</sup>
เหนือ	ไม่มีความเสียหาย	300-1,000	0.881
		1,000-2,000	0.817
		2,000-4,000	0.748
		4,000-8,000	0.591
		≥ 8,000	0.584
	เสียหายรอยแตก	300-1,000	-
		1,000-2,000	0.812
		2,000-4,000	0.813
		4,000-8,000	0.873
		≥ 8,000	0.925
	เสียหายหลุมบ่อ	300-1,000	-
		1,000-2,000	0.707
		2,000-4,000	0.838
		4,000-8,000	0.622
		≥ 8,000	-
ตะวันออกเฉียงเหนือ	ไม่มีความเสียหาย	1,000-2,000	0.801
		2,000-4,000	0.817
		4,000-8,000	0.787
	เสียหายรอยแตก	1,000-2,000	0.860
		2,000-4,000	0.802
	เสียหายหลุมบ่อ	1,000-2,000	0.733
		2,000-4,000	0.868

การเสื่อมสภาพที่พัฒนา มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ในช่วงประมาณ 0.6 ถึง 0.8 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเป็นไปในทิศทางเดียวกัน มีความใกล้เคียงกันมาก และมีความสัมพันธ์กัน

สูง ซึ่งอยู่ในระดับที่เพียงพอในการพยากรณ์สภาพสายทางเพื่อใช้ในระดับโครงข่าย โดยแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดคือ แบบจำลองพื้นที่ภาคเหนือ ที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีสูงกว่า 8,000 คัน/วัน และมีความเสียหายรอยแตก ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.925

#### 4.3.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

การเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือระหว่างแบบจำลอง เพื่อพิสูจน์สมมติฐานของงานวิจัยว่า ปัจจัยด้านความเสียหายผิวทางมีผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพทาง เนื่องจากงานวิจัยนี้พิจารณาปัจจัยทางด้านสภาพความเสียหายของผิวทางเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพผิวทาง ในขณะที่แบบจำลองของ วีระชัย (2547) ไม่พิจารณาผลกระทบของความเสียหายผิวทาง โดยเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองซึ่งมีขอบเขตการเปรียบเทียบด้วยข้อมูลสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 และ 1,000 - 2,000 คัน/วัน เนื่องจากแบบจำลองของ วีระชัย (2547) มีขอบเขตการใช้งานที่ระดับปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันไม่เกิน 2,000 คัน/วัน

วิธีการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง ใช้การเปรียบเทียบระดับความเชื่อมั่นของค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง โอกาสที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่พยากรณ์ด้วยแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่ในช่วงค่าที่ประมาณได้ เช่น  $P(L < IRI < U) = 0.95$  หมายถึงโอกาสที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลจากการทำนาย จะมีค่าอยู่ในช่วง L และ U (L ต่ำ และ U สูง) เป็น 0.95 หรือ 95% และโอกาสที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลจากการทำนายจะมีค่าน้อยกว่า L หรือ มากกว่า U เป็น 0.05 หรือ 5% โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

ช่วงความเชื่อมั่น  $(1-\alpha)\%$  ของ  $\mu$  คือ

$$L < \mu < U$$

$$\text{หรือ} \quad \bar{X} - Z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + Z_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \dots 4.2$$

โดย  $\mu$  = ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

$\alpha$  = โอกาสที่ค่าประมาณผิดพลาด

-

X = ค่าเฉลี่ยตัวอย่างข้อมูล

S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความคลาดเคลื่อน

Z = ระดับความเชื่อมั่น (ปกติคือ 90% 95% หรือ 99%)

N = จำนวนตัวอย่างค่าความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนา กับแบบจำลองของ วีระชัย (2547) ด้วยข้อมูลสายทางพื้นที่ภาคเหนือ ที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 คัน/วัน และไม่มี ความเสียหายผิวทางในปี พ.ศ. 2551 พบว่าแบบจำลองของ วีระชัย มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.21 ม./กม. ถึง 0.46 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.11 ม./กม. ถึง 0.37 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% แสดงว่าการปัจจัยทางด้านความเสียหายของผิวทาง มีผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพผิวทาง โดยสามารถสรุปเปรียบเทียบแบบจำลองได้ทั้งหมด 7 กลุ่ม ดังที่แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างการเปรียบเทียบแบบจำลอง

หมายเลขสายทาง	หมายเลขควบคุม	กิโลเมตรเริ่มต้น	กิโลเมตรปลาย	IRI พ.ศ. 2551	$X_V$ พ.ศ. 2551	$X_S$ พ.ศ. 2551
1080	0401	106+000	107+000	3.79	-0.34	-0.59
1080	0401	107+000	108+000	2.42	0.53	0.28
1080	0401	108+000	109+000	2.42	0.33	0.11
1080	0401	109+000	110+000	3.37	-1.78	-1.88
1080	0401	110+000	111+000	3.11	0.49	0.25
1080	0401	111+000	112+000	1.77	0.28	0.13
1080	0401	112+000	113+000	1.97	0.05	-0.09
1080	0401	113+000	114+000	2.04	0.31	0.13
1089	0302	27+000	28+000	4.62	-0.28	-0.42
1089	0302	28+000	29+000	4.55	-0.01	-0.11
1168	0100	1+000	2+000	5.68	-0.64	-0.59

**หมายเหตุ**  $X_v$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยแบบจำลองของ (วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร, 2547)

$X_s$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้

จากตารางที่ 4.16 พบว่าแบบจำลองในงานวิจัยนี้ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง 5 ประเภทสามารถพยากรณ์ค่าดัชนีความขรุขระสากลได้แม่นยำกว่าแบบจำลองของ วีระชัย (2547) ที่พิจารณาเฉพาะปัจจัยด้านปริมาณการจราจร และสภาพแวดล้อม โดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 0.10 ม./กม. ถึง 0.40 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ วีระชัย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ช่วงประมาณ 0.20 ม./กม. ถึง 0.50 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

ตารางที่ 4.16 สรุปการเปรียบเทียบแบบจำลองกับค่าดัชนีความเรียบสากลจริง

ภูมิภาค	ความเสียหาย	ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (คัน/วัน)	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ระดับความเชื่อมั่น 90%	
			IRI จริง กับ $IRI_v$	IRI จริง กับ $IRI_s$
เหนือ	ไม่มีความเสียหาย	300-1,000	$0.21 < \mu < 0.46$	$0.11 < \mu < 0.37$
		1,000-2,000	$0.23 < \mu < 0.39$	$0.15 < \mu < 0.31$
	เสียหายรอยแตก	1,000-2,000	$0.19 < \mu < 0.44$	$0.13 < \mu < 0.40$
	เสียหายหลุมบ่อ	1,000-2,000	$0.09 < \mu < 0.51$	$0.05 < \mu < 0.48$
ตะวันออกเฉียงเหนือ	ไม่มีความเสียหาย	1,000-2,000	$0.25 < \mu < 0.44$	$0.17 < \mu < 0.37$
	เสียหายรอยแตก	1,000-2,000	$0.28 < \mu < 0.59$	$0.05 < \mu < 0.37$
	เสียหายหลุมบ่อ	1,000-2,000	$0.18 < \mu < 0.53$	$0.12 < \mu < 0.46$

**หมายเหตุ**  $IRI_v$  คือ ค่า IRI จากการทำนายด้วยแบบจำลองของ วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร (2547)

$IRI_s$  คือ ค่า IRI จากการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้

#### 4.4 การทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายผิวทาง

การทดสอบว่าปัจจัยใดที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพของผิวทาง กระทำโดยการสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางที่แบ่งค่าดัชนีความขรุขระสากลตามปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพผิวทาง โดยในงานวิจัยนี้แบ่งข้อมูลค่าดัชนีความขรุขระสากลตาม ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี สิ่งแวดล้อม และระดับความเสียหาย ที่เกิดขึ้นกับผิวทาง ที่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณทำให้เป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม ถ้าแบบจำลองที่สร้างโดยการแบ่งกลุ่มปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพของผิวทางในแต่ละกลุ่มมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลไม่เท่ากัน แสดงว่าปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทางตัวนั้นส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทาง แต่ถ้าแบบจำลองที่สร้างโดยการแบ่งกลุ่มปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทางในแต่ละชนิดมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความขรุขระสากลเท่ากันหรือมีความใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าปัจจัยที่คาดไว้นั้นๆ ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพของผิวทาง

จากข้อมูลสายทางทั่วประเทศ เมื่อจัดกลุ่มข้อมูลจำแนกตามปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีและความเสียหาย พบว่าสามารถพัฒนาแบบจำลองได้ทั้งหมด 19 แบบจำลอง โดยเป็นแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางในพื้นที่ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด เนื่องจากข้อมูลความเสียหายของสายทางในพื้นที่ภาคกลาง ตะวันออก ตะวันตก และภาคใต้มีปริมาณไม่เพียงพอในการพัฒนาแบบจำลอง

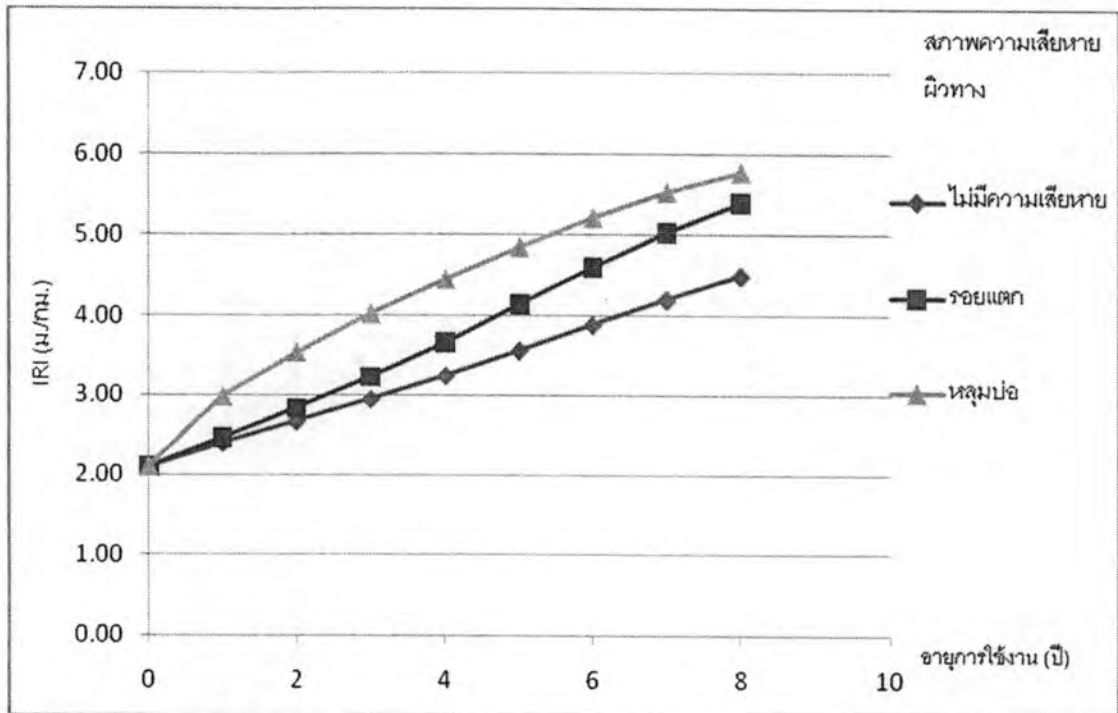
การทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยทดสอบเปรียบเทียบผลกระทบที่แต่ละปัจจัยมีต่อค่าดัชนีความขรุขระสากลแยกตามปัจจัย ซึ่งการวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพทางด้วยกัน 5 ปัจจัย คือ ปัจจัยทางด้านความเสียหายผิวทาง ปัจจัยทางด้านความแข็งแรงของทาง ปัจจัยทางด้านปริมาณการจราจร และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม

##### 4.4.1 ปัจจัยทางด้านความเสียหายของผิวทาง

รูปที่ 4.11 แสดงค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สภาพความเสียหายต่างๆ ในเขตพื้นที่ภาคเหนือในช่วงปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 20,000 คัน/วัน แสดงให้เห็นว่า ความเสียหายที่ผิวทางมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความขรุขระของทาง โดยมีความสัมพันธ์ในเชิงแปรผันตามระดับความเสียหายผิวทาง สายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อ ซึ่ง

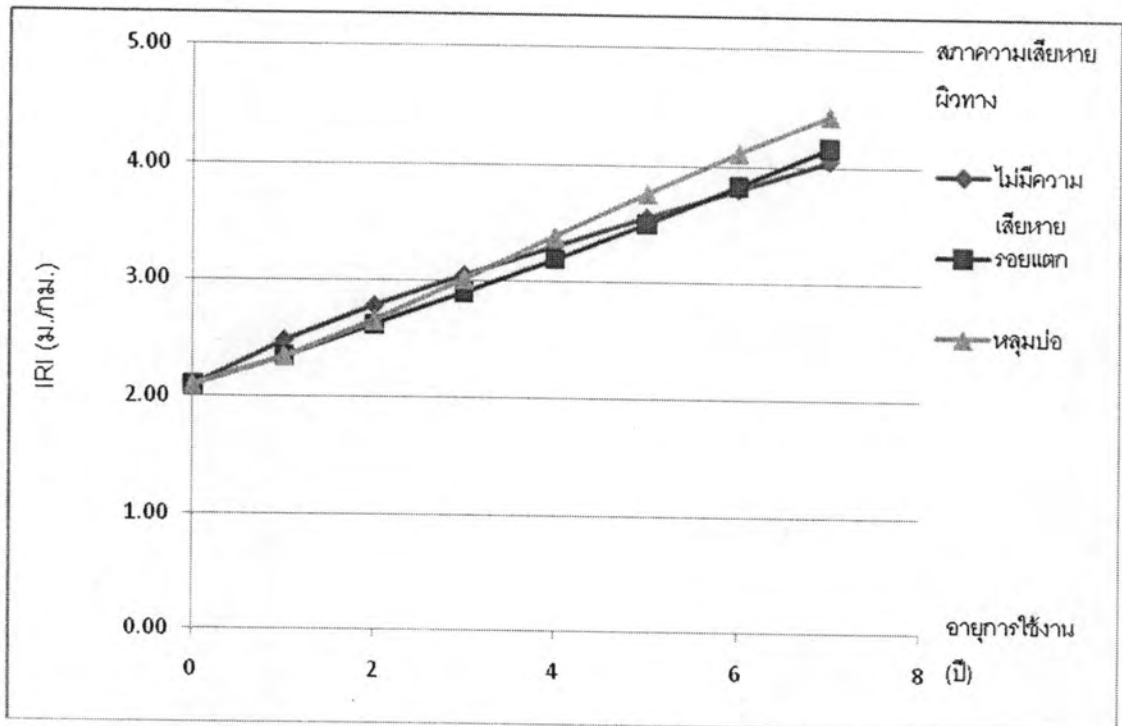


เป็นความเสียหายที่ส่งผลต่อชั้นโครงสร้างทางจะมีอัตราการเสื่อมสภาพของผิวทางสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสายทางที่มีความเสียหายรอยแตก และสายทางที่ไม่มีความเสียหายตามลำดับ

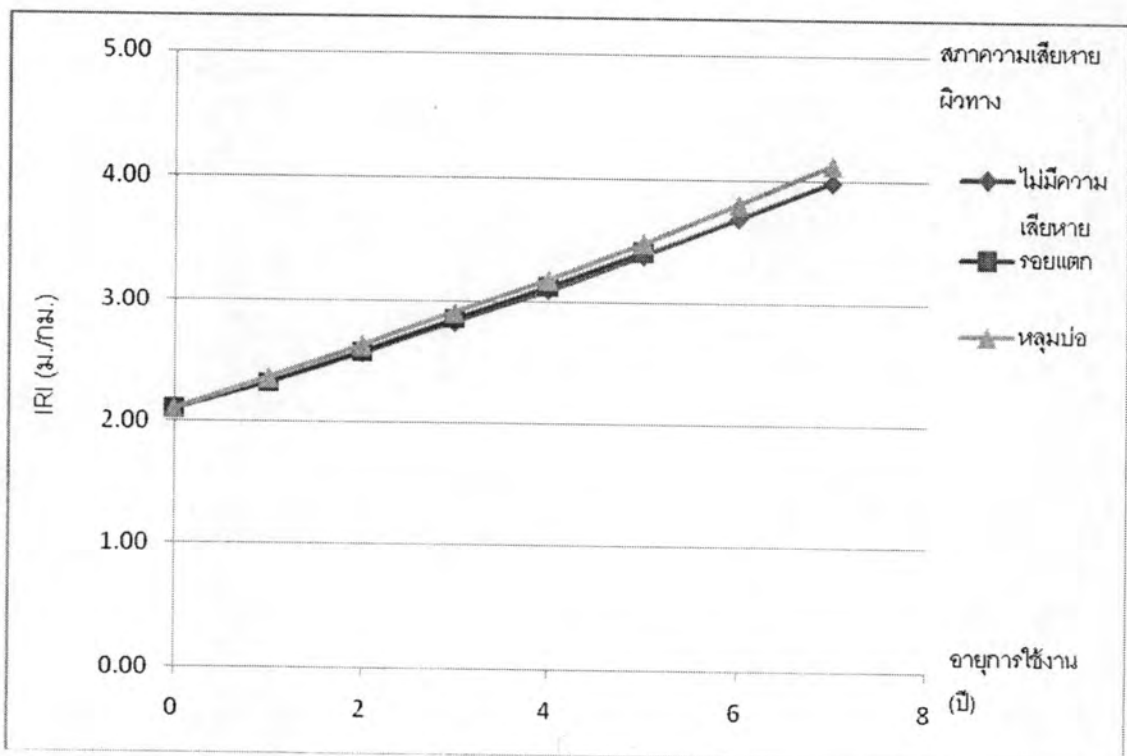


รูปที่ 4.11 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สภาพความเสียหายผิวทางต่างๆ ในเขตพื้นที่ภาคเหนือ

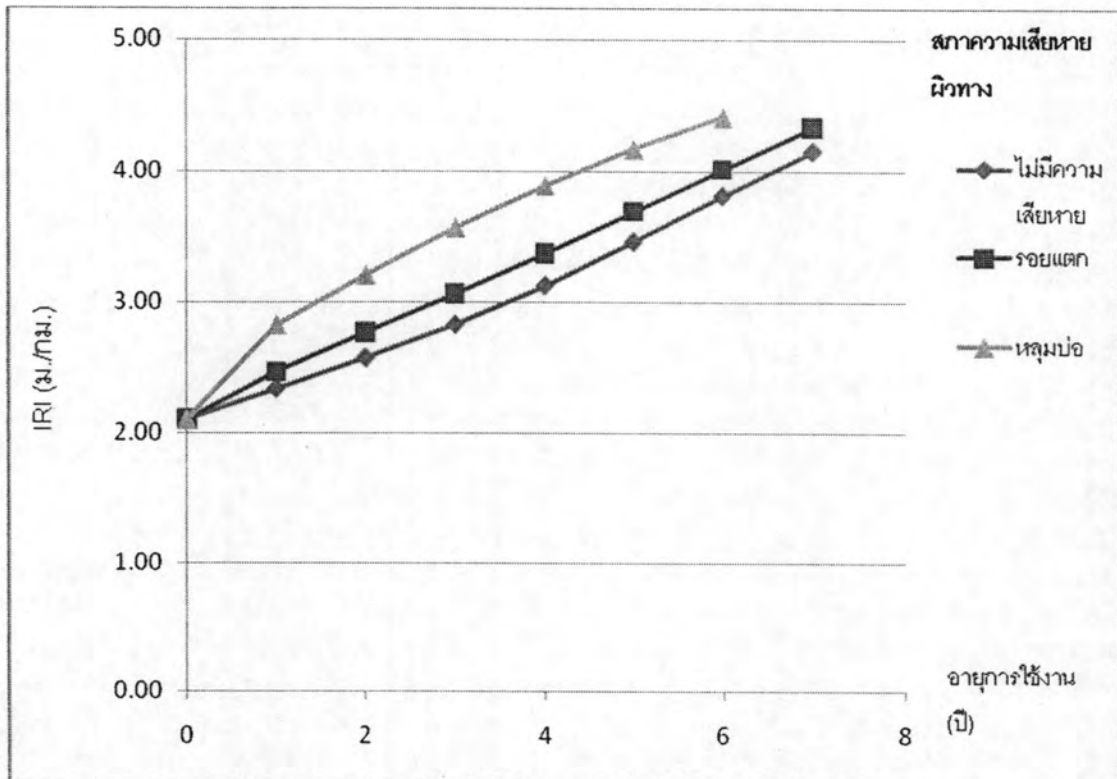
จากรูปดังกล่าวสรุปได้ว่าความเสียหายของผิวทางส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวทาง น้ำสามารถเข้าสู่ชั้นโครงสร้างทางทำให้การเกาะตัวและความหนาแน่นในชั้นโครงสร้างลดลง เป็นผลให้อัตราการเสื่อมสภาพของสายทางเพิ่มขึ้น ส่วนสายทางที่ไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้น จะสามารถรักษาความแข็งแรงของโครงสร้างทางไว้ได้ ความหนาแน่นจากการบดอัดและการเกาะตัวของวัสดุชั้นทางใกล้เคียงกับตอนสร้างใหม่ ดังนั้นการแอ่นตัวและการลื่นไถลชั้นทางน้อย เป็นผลให้อัตราการเสื่อมสภาพของทางเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายทางที่ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง ดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงปริมาณการจราจรเท่าใดก็ตาม สายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อมีอัตราการเสื่อมสภาพผิวทางสูงที่สุด และสายทางที่ไม่มีความเสียหายผิวทางจะมีอัตราการเสื่อมสภาพต่ำที่สุด



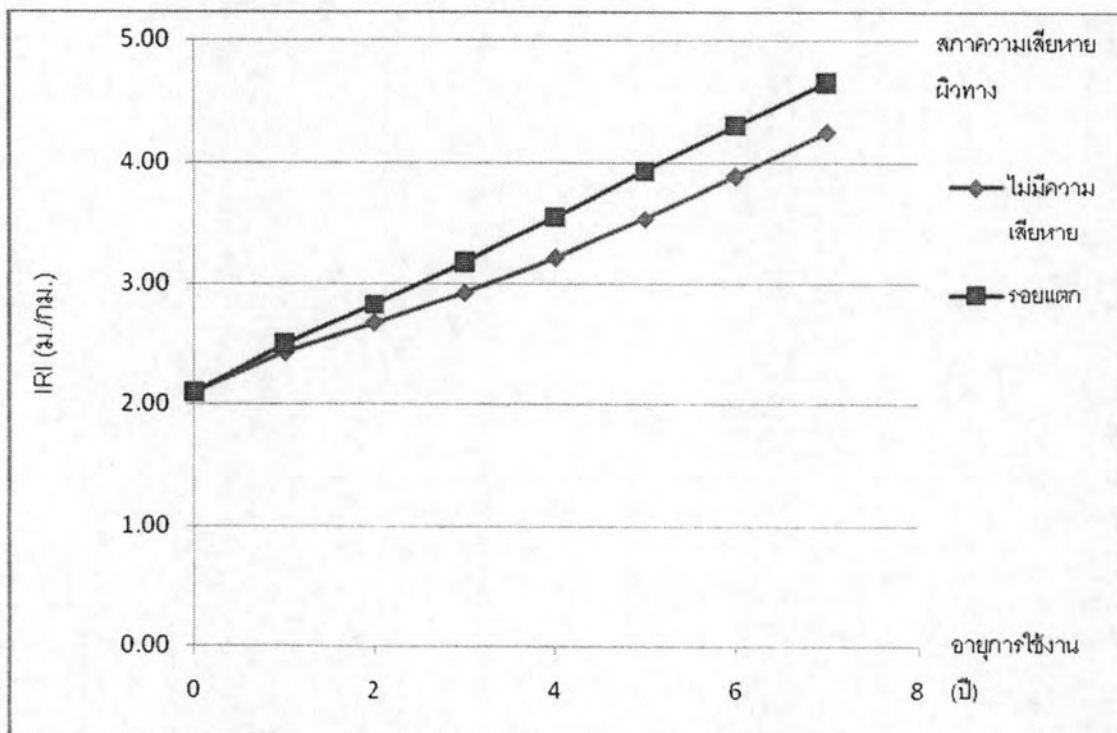
รูปที่ 4.12 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 1,000-2,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ



รูปที่ 4.13 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000-4,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ



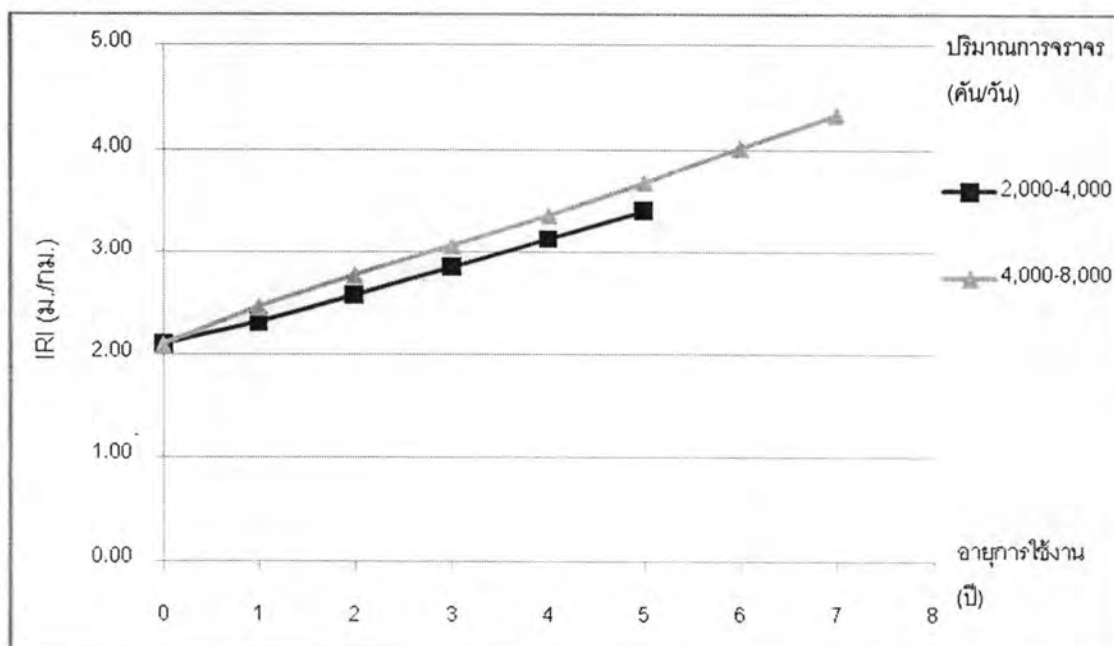
รูปที่ 4.14 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 4,000-8,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ



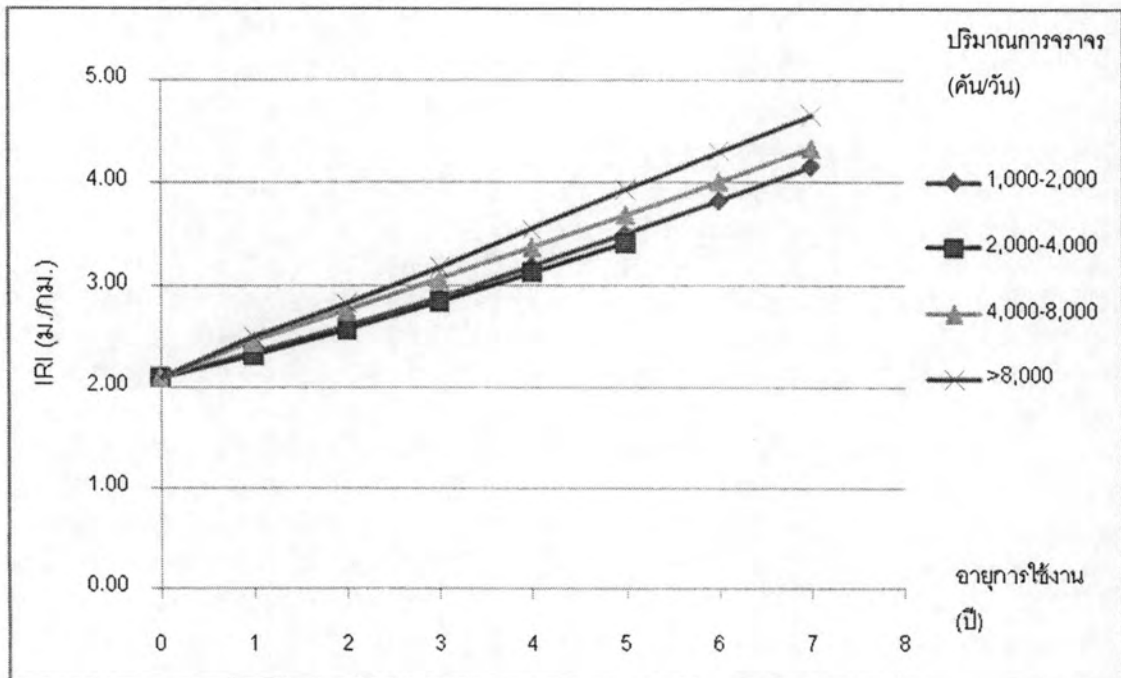
รูปที่ 4.15 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีมากกว่า 8,000 คัน/วัน ในพื้นที่ภาคเหนือ

#### 4.4.2 ปัจจัยทางด้านความแข็งแรงโครงสร้างและปริมาณการจราจร

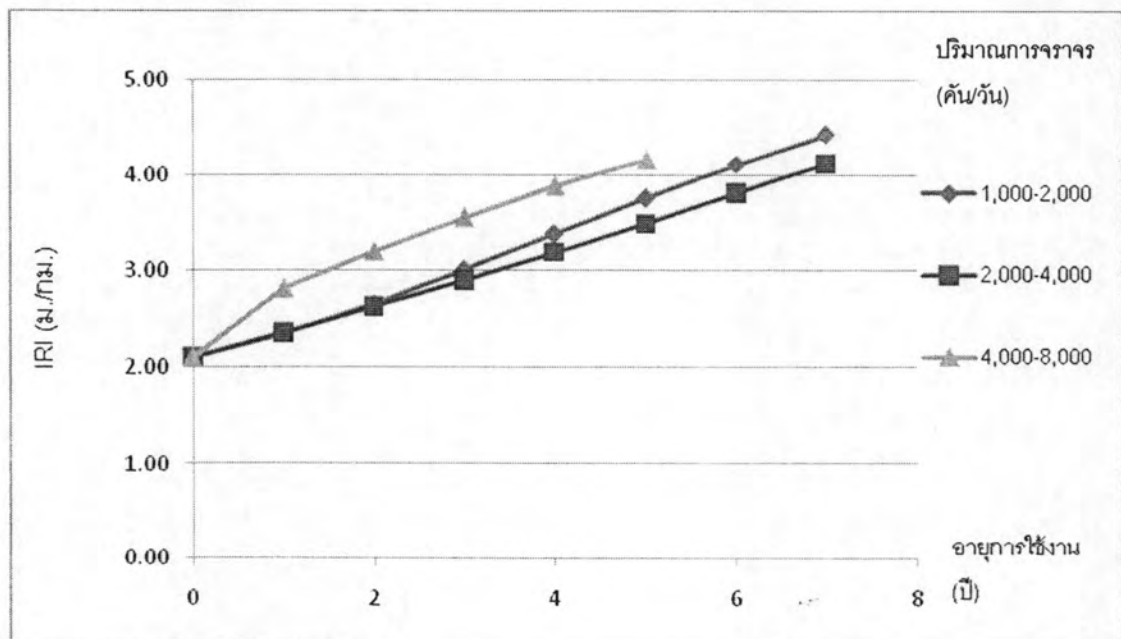
รูปที่ 4.16 พบว่าปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีและความแข็งแรงของโครงสร้างทางส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพทาง เมื่อพิจารณาสายทางที่มีโครงสร้างทางแข็งแรงปานกลาง (ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีอยู่ระหว่าง 2,000 - 8,000 คัน/วัน) สายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีสูงกว่า จะมีอัตราการเสื่อมสภาพมากกว่าสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีน้อยกว่า แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบทุกปริมาณการจราจร ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 และ 1,000 - 2,000 คัน/วัน มีอัตราการเสื่อมสภาพสูงกว่าสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 2,000 - 4,000 คัน/วัน ซึ่งสาเหตุมาจาก สายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี 300 - 1,000 และ 1,000 - 2,000 คัน/วัน เป็นสายทางที่มีความแข็งแรงอยู่ในระดับต่ำ ด้วยปริมาณการจราจรที่น้อยกว่า สามารถมีผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพทาง ทำให้มีอัตราการเสื่อมสภาพสูงกว่าสายทางที่มีปริมาณการจราจรสูงแต่มีระดับความแข็งแรงที่มากกว่า



รูปที่ 4.16 ค่าดัชนีความขรุขระสากลของสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างปานกลาง มีความเสียหายรอยแตก ในพื้นที่ภาคเหนือ



รูปที่ 4.17 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีความเสียหายรอยแตก ในพื้นที่ภาคเหนือ



รูปที่ 4.18 ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่มีความเสียหายหลุมบ่อ ในพื้นที่ภาคเหนือ

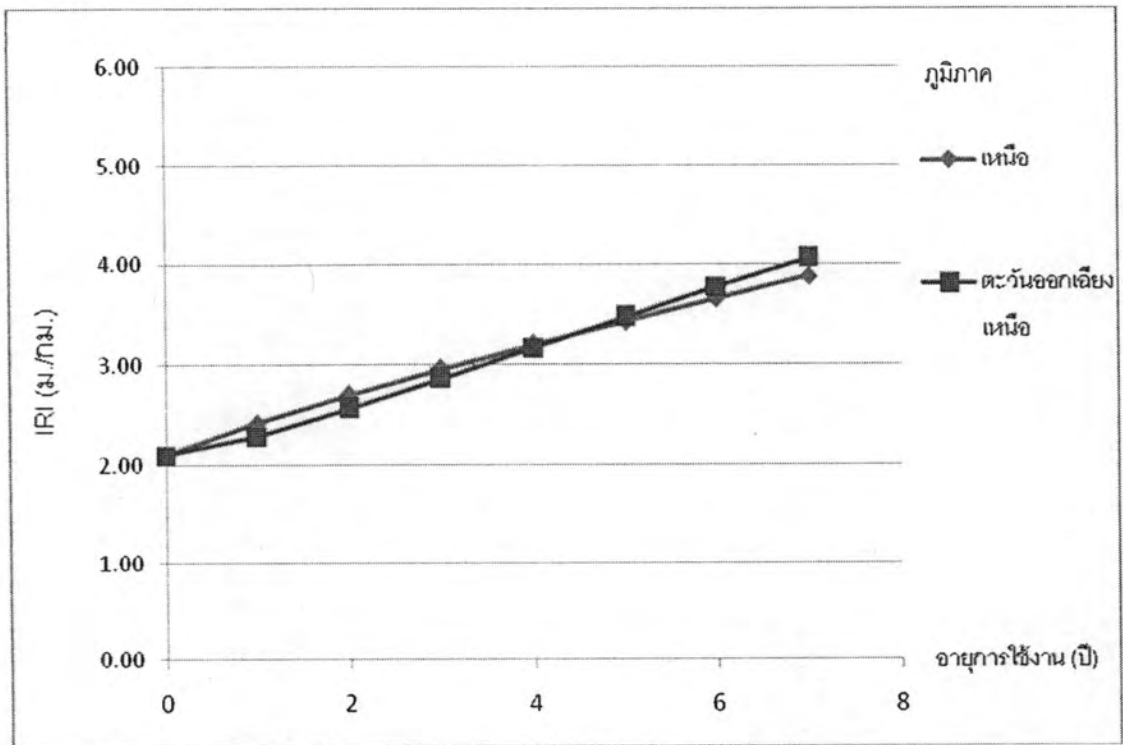
#### 4.4.3 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม

รูปที่ 4.19 – 4.20 แสดงในสายทางที่ไม่มีความเสียหายและมีความเสียหายระดับผิวทาง ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมแทบไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสภาพทาง ในขณะที่สายทางที่มีความเสียหายในระดับโครงสร้างจะส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพทางอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากข้อมูลตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าพื้นที่ภาคเหนือมีอุณหภูมิเฉลี่ย และปริมาณน้ำฝนใกล้เคียงกัน แต่ในพื้นที่ภาคเหนือเป็นพื้นที่ที่มีภูเขาเป็นจำนวนมากและมีสายทางหลายสายตัดผ่านตามแนวเขา ดังนั้นสายทางในพื้นที่ภาคเหนือจึงได้รับผลกระทบจากความลาดชันมากกว่าสายทางในพื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังนั้นเมื่อสายทางมีความเสียหายหลุมบ่อ ความลาดชันจึงเป็นปัจจัยทางสภาพแวดล้อมไปเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของทาง

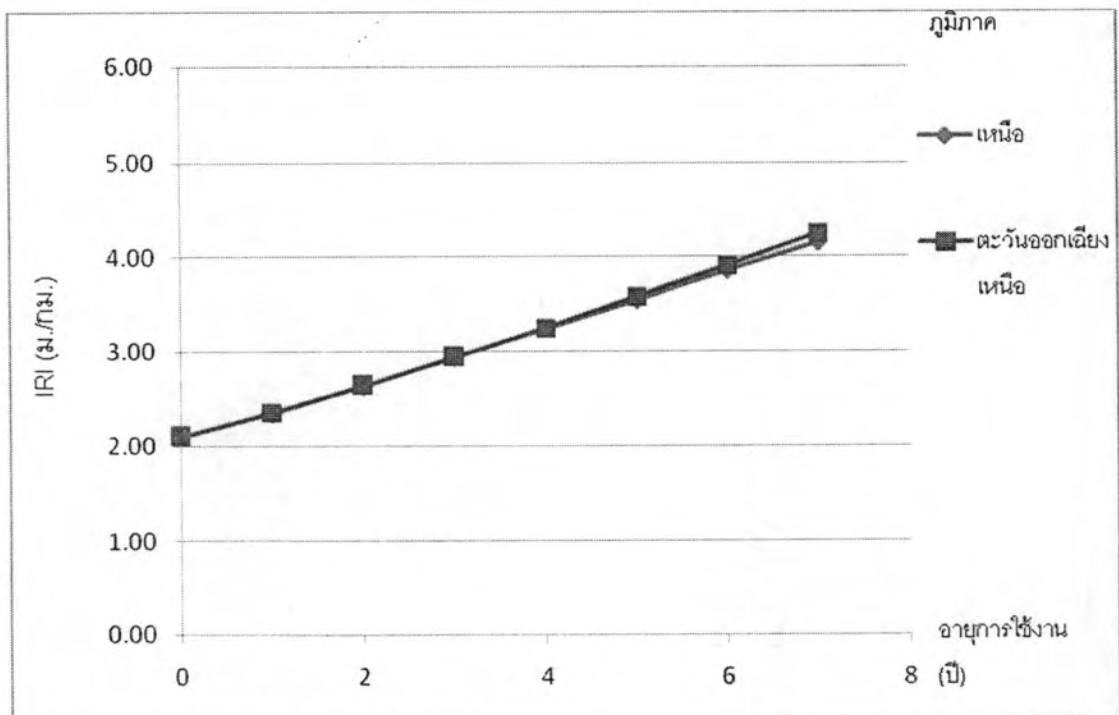
#### 4.5 บทสรุป

สายทางแต่ละสายทางมีพฤติกรรมการเสื่อมสภาพผิวทางที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยซึ่งส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของผิวทาง ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองด้วยกระบวนการมาร์คอฟจึงต้องจัดกลุ่มสายทางตามปัจจัยดังกล่าวเพื่อแยกสายทางที่มีพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของผิวทางที่เหมือนกัน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อสภาพผิวทางและลักษณะของการเสื่อมสภาพผิวทางได้ โดยในงานวิจัยนี้จำแนกสายทางตามปัจจัยด้านความแข็งแรง โครงสร้าง ปริมาณการจราจร สภาพความเสียหาย และสภาพแวดล้อมของทาง พบว่าปัจจัยทางด้านความแข็งแรงโครงสร้างทางมีความสัมพันธ์ต่อการเสื่อมสภาพผิวทางอย่างเห็นได้ชัด

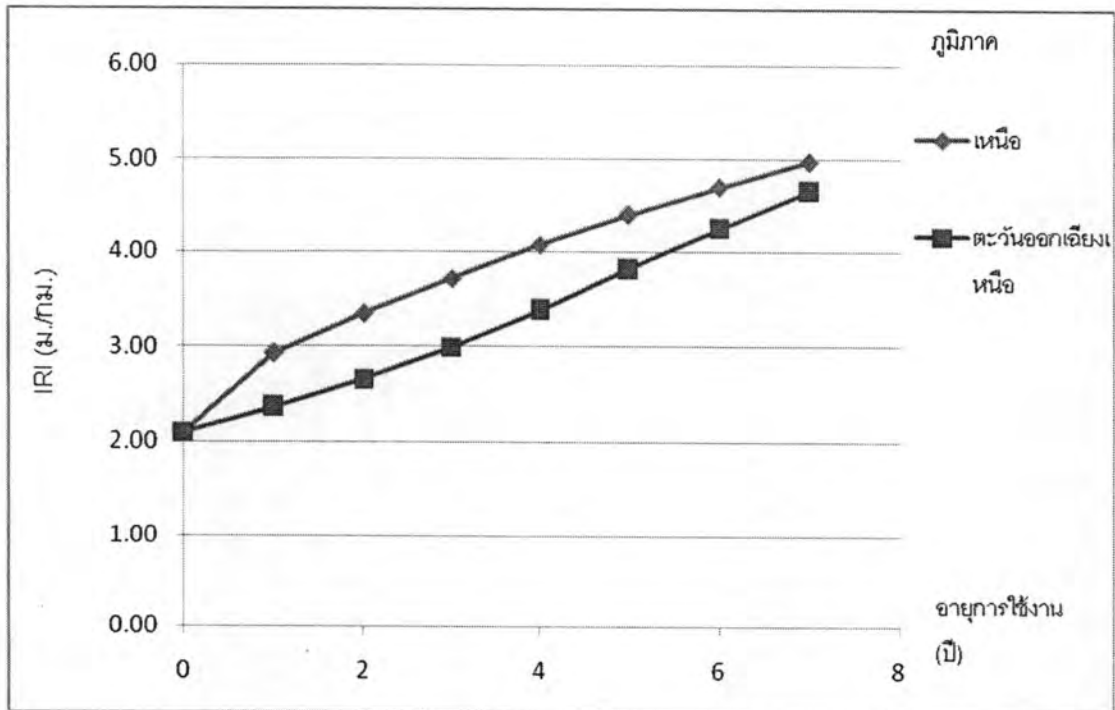
โดยสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างสูงจะมีอัตราการเสื่อมสภาพผิวทางน้อยกว่าสายทางที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างต่ำกว่า ในขณะที่เดียวกันสายทางที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างเท่ากัน สายทางที่มีปริมาณการจราจรสูงกว่าจะมีอัตราการเสื่อมสภาพผิวทางต่ำกว่าสายทางที่มีปริมาณการจราจรต่ำ ส่วนปัจจัยทางด้านความเสียหายพบว่าสายทางที่มีความเสียหายหลุมบ่อซึ่งเป็นความเสียหายที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจะมีอัตราการเสื่อมสภาพผิวทางสูงกว่าสายทางที่มีความเสียหายรอยแตกและสายทางที่ไม่มีความเสียหายตามลำดับ ในส่วนของปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมขึ้นอยู่กับสภาพทางด้านภูมิประเทศและสภาพอากาศของแต่ละพื้นที่ โดยในการวิจัยนี้แบ่งพื้นที่ตามภูมิภาคของไทย จากการจัดกลุ่มสายทางดังกล่าวสามารถสร้างแบบจำลองการเสื่อมสภาพผิวทางได้ทั้งหมด 19 แบบจำลอง



รูปที่ 4.19 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่ไม่มีความเสี่ยง



รูปที่ 4.20 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่มีรอยแตก



รูปที่ 4.21 ค่าความขรุขระสากลที่สภาพแวดล้อมต่างๆ ในสายทางที่มีหลุมบ่อ

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สำรวจและเก็บรวบรวมจริง เปรียบเทียบกับค่าความขรุขระสากลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยกระบวนการมาร์คอฟทั้ง 19 แบบจำลอง โดยการวิเคราะห์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งพบว่าการพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟโดยพิจารณาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทางในงานวิจัยนี้ มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานในระดับโครงข่ายได้ และเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในอดีตซึ่งไม่พิจารณาปัจจัยด้านความเสียหายผิวทาง โดยใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการเปรียบเทียบ พบว่าสายทางที่พิจารณาปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยในงานวิจัยนี้ มีความแม่นยำกว่า โดยสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนได้ประมาณ 0.20 ม./กม. ถึง 0.35 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ซึ่งมีความแม่นยำกว่าแบบจำลองในอดีต ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 0.30 ม./กม. ถึง 0.50 ม./กม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%