การศึกษาความยืดหยุ่นของระบบรางในประเทศไทย

A Study of Resilience in Thai Rail System

ร้อยเอก สมิทธิภัทร คำประพันธ์[1,*] ร้อยเอก ธนินทร์ ชื่นมาลัย[2] และ Dr. Thomas H. Wakeman III[3]

[1,2] กองวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

[3] Resilience Engineering Services (RES), New York, New York, USA

**Corresponding author; E-mail address: smithipatt.kh@crma.ac.th*

บทคัดย่อ

ความยืดหยุ่นของระบบ หรือความสามารถในการฟื้นตัวกลายเป็นคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับระบบเครือข่ายโครงสร้างพื้นฐานเพื่อให้สามารถอยู่รอดภายใต้สภาวะวิกฤตได้ ไม่ว่าจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือการกระทำของมนุษย์ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่นำมาใช้กับการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นของระบบเครือข่ายรถไฟของไทย โดยกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวสำหรับเครือข่ายโครงสร้างพื้นฐาน งานวิจัยนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ทฤษฎีกราฟ ผลการวิจัยพบว่าความยืดหยุ่นของระบบรถไฟของไทยสามารถวิเคราะห์ได้โดยการประเมินความถดถอยของประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อระบบเมื่อถูกรบกวนจากเหตุการณ์ที่ลดทอนประสิทธิภาพของเครือข่าย

คำสำคัญ: การฟื้นตัวของระบบ, ระบบราง, เครือข่ายโครงสร้างพื้นฐาน, ทฤษฎีกราฟ

Abstract

Resilience becomes an important attribute for networked infrastructure systems to survive from severe disruptive events, either natural or man-made. This study aims to determine how resiliency in Thai rail system can be modeled. Building upon existing work on transportation resilience, this study discusses resilience measure for networked infrastructure how to improve resiliency. A thorough literature review was conducted on infrastructure system resilience to develop a resilience assessment model. The physical Thai rail network was mapped, and network connectivity was measured. The analysis of the results indicated that resilience for Thai rail system can be measured by assessing degradation of network connectivity under disruptions.

Keywords: system resilience, rail system, networked infrastructure system, graph theory

1. บทนำ

ระบบขนส่งเป็นส่วนสำคัญพื้นฐานของระบบเศรษฐกิจและสังคม พื้นที่หรือสถานที่ต่าง ๆ ที่กระจัดกระจาย ถูกเชื่อมโยงให้สามารถเข้าถึงกันได้ด้วยระบบขนส่ง ไม่ว่าจะเป็นระบบขนส่งส่วนบุคคลหรือระบบขนส่งสาธารณะ โดยทางบก ทางน้ำ ทางอากาศ หรือทางท่อ ทั้งในระดับท้องถิ่น ภูมิภาค และระดับชาติ การเชื่อมต่อนี้ส่งผลให้ประชาชนสามารถเข้าถึงสินค้าและบริการ ก่อให้เกิดการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม ตลอดจนพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชาชนให้ดียิ่งขึ้นด้วย [1]

การขนส่งผู้โดยสารหรือสินค้าจำนวนมากในประเทศไทย มักใช้การขนส่งทางราง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วยต่ำ สะดวกในการขนส่งเป็นระยะทางไกล มีความปลอดภัย และก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่าทางถนน [2]

อย่างไรก็ตามเหตุการณ์รบกวนต่าง ๆ เช่น อุบัติเหตุ ความขัดข้องทางเทคนิคของตัวระบบเอง การก่อการร้าย หรือภัยพิบัติทางธรรมชาติ อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบขนส่งลดลง หรืออาจถึงจุดที่เกิดความล้มเหลวสิ้นเชิง (Complete Failure) ของระบบขนส่ง อันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเศรษฐกิจและสังคม ในระยะสั้นหรือระยะยาว ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจต้องการการฟื้นฟูเป็นระยะเวลานานและยากลำบาก หรือไม่สามารถฟื้นฟูให้คืนกลับสู่สภาวะเดิมอีกเลยก็ได้

เพื่อป้องกันมิให้ความเสียหายดังกล่าวเกิดขึ้นกับระบบขนส่งที่สำคัญยิ่ง ความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการฟื้นคืนกลับของระบบ (System Resilience) จึงเป็นคุณสมบัติที่มีความจำเป็นต่อการพัฒนาปรับปรุงระบบขนส่ง ให้สามารถหลีกเลี่ยงความล้มเหลวสิ้นเชิงระยะยาว โดยระบบที่มีความยืดหยุ่นจะสามารถต้านทานการรบกวน หรือในกรณีที่ไม่สามารถต้านทานได้ ก็สามารถฟื้นคืนกลับสู่สภาวะที่สามารถใช้งานได้ (Functional State) ด้วยระยะเวลา และงบประมาณที่เหมาะสม

ด้วยเหตุนี้ การศึกษา และวิเคราะห์ความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการฟื้นตัวของระบบจึงมีความสำคัญในการวางแผนเสริมสร้างและพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐาน ให้สามารถดำรงขีดความสามารถแม้ได้รับผลกระทบจากอุบัติภัยต่าง ๆ หรือให้ระบบสามารถคืนกลับสู่สภาวะปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวยังจะช่วยให้

สามารถระบุจุดอ่อนจุดแข็งของเครือข่ายระบบขนส่ง ข้อมูลจากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการตัดสินใจบริหารทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อปรับปรุงพัฒนาเครือข่ายโครงสร้างพื้นฐาน และระบบขนส่งให้สามารถรองรับเหตุการณ์รบกวนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเครือข่ายระบบรางในประเทศไทยที่รองรับความต้องการการเดินทาง และการขนส่งสินค้าในปัจจุบัน โดยทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างเครือข่ายของระบบขนส่ง (Transport Network) ไปจนถึงคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและส่งผลต่อความสามารถในการฟื้นตัวของระบบ โดยทำการจำลองการโจมตีของความผันผวนต่อระบบทำการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์เพื่อหาค่าการฟื้นตัวของระบบในปัจจุบัน ท้ายที่สุดผลการวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการตัดสินใจและพัฒนาเครือข่ายรถไฟ ให้มีความสามารถในการฟื้นตัว และสามารถรองรับความผันผวนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำจำกัดความของคำว่า Resilience

คำจำกัดความของคำว่า “Resilience” หรือความยืดหยุ่น นั้นแตกต่างออกไปตามแต่ละสาขาทางวิชาการที่ใช้งาน ในพจนานุกรม Merriam-Webster ได้ให้คำนิยามของคำว่า “Resilience” ไว้ว่าเป็น “ความสามารถของกายภาพที่แข็งเกร็งที่จะฟื้นคืนรูปร่างหรือรูปทรงกลับจากการเสียรูปร่างอันเกิดจากแรงกดดัน และ ความสามารถในการฟื้นตัว หรือปรับสภาพต่อความโชคร้ายหรือการเปลี่ยนแปลงได้ดี” [4] แนวคิดเรื่องความยืดหยุ่นนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกในงานวิจัยระบบนิเวศวิทยา ของ Holling โดยได้มีการให้คำจำกัดความไว้ว่าเป็น “ความสามารถของระบบในการดูดซับการเปลี่ยนแปลงของสถานภาพของตัวแปรต่าง ๆ และยังสามารถคงสภาพได้” [5]

นอกเหนือจากการนิยามคำจำกัดความที่หลากหลายแล้ว นักวิจัยจำนวนมากยังกำหนดคุณสมบัติของความสามารถในการฟื้นตัวตามที่ได้นิยามไว้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น Bruneau et al. ได้เสนอกรอบการทำงานสำหรับการประเมินค่าการฟื้นตัวในเชิงปริมาณ โดยได้แนะนำว่าความสามารถในการฟื้นตัวควรครอบคลุม 4 มิติ ซึ่งแสดงคุณสมบัติสำคัญของความยืดหยุ่นของระบบอยู่ในการพิจารณาด้วย ได้แก่ มิติทางด้านเทคนิค, องค์กร, สังคม, และเศรษฐกิจ ระบบที่มีความยืดหยุ่น หรือมีความสามารถในการฟื้นตัวที่ดี ควรที่จะให้ผลลัพธ์ 3 ประการ คือ ลดโอกาสที่ระบบจะเกิดความล้มเหลวสิ้นเชิง, ลดความเสียหายจากเหตุการณ์ความผันผวน, และลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการฟื้นฟู แนวความคิดนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านการฟื้นตัวของระบบอย่างแพร่หลายในเวลาต่อมา [6 – 8]

ถึงแม้ว่าคำจำกัดความ และแนวความคิดของความยืดหยุ่นจะมีหลากหลาย แต่ส่วนที่มีความคล้ายกันคือแนวคิดที่ว่า ความสามารถในการฟื้นตัวนั้นสามารถประมาณค่าได้จากผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ดังนั้นมุมมองของนักวิจัยต่อระบบที่สนใจจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติ และตัวแปรที่ใช้ในการประเมินค่าความสามารถในการฟื้นตัวของระบบนั้น ๆ [9 - 10]

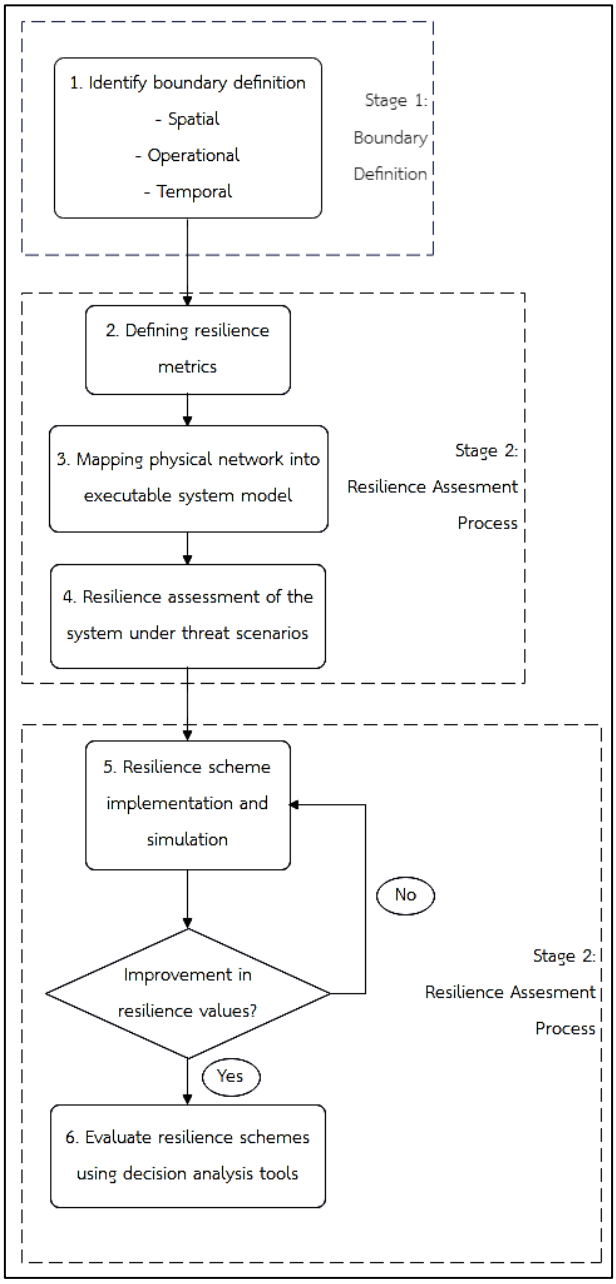
2.2 ทฤษฎีกราฟ

เทคนิคหนึ่งที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการวิจัยระบบขนส่งเพื่อที่จะวัดระดับประสิทธิภาพของระบบขนส่ง คือ การใช้ทฤษฎีกราฟ (Graph Theory) โดยเป็นการจำลองลักษณะโครงสร้างกายภาพของเครือข่ายระบบขนส่งให้อยู่ในรูปของแผนภาพทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในเครือข่าย [1] ในรูปของเซ็ตของ Vertices (หรือ Nodes) และ Edges (หรือ Links) เมื่อ Node เป็นตัวแทนของ สถานี, ป้ายหยุด, ทางแยก หรือ ชุมทางขนส่ง และ Link แสดงเส้นทางถาวรที่ให้บริการเชื่อมต่อ Node ต่าง ๆ เหล่านั้น การใช้ทฤษฎีกราฟมาช่วยในการวิเคราะห์เครือข่ายระบบขนส่งช่วยขจัดข้อจำกัดทางกายภาพในการศึกษาโครงสร้างเครือข่ายระบบขนส่ง และยังสามารถแปรสภาพความสัมพันธ์ให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ตลอดจนประสิทธิภาพของระบบด้วย [11] นักวิจัยหลายท่านได้ใช้ทฤษฎีกราฟในการวิเคราะห์ และวัดประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายขนส่ง โดยงานเหล่านี้ต่อมาได้ถูกนำไปใช้ในการสร้างการวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวของระบบเครือข่ายในเวลาต่อมา [12]

2.3 การหาค่าความยืดหยุ่นของระบบขนส่ง

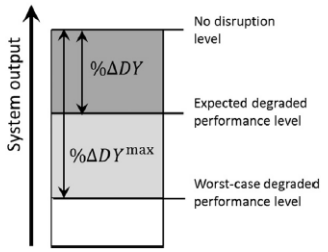
การวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ การวัดในเชิงคุณภาพช่วยประเมินคุณสมบัติต่าง ๆ ของการฟื้นตัวได้ แต่ไม่แสดงออกเป็นค่าตัวเลขทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ของงานวิจัยเชิงคุณภาพจะได้เป็น แผนผังความคิด (Conceptual Framework) หรือ ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ (การรวมผลลัพธ์ของแต่ละมิติเป็นค่ารวมค่าหนึ่ง) ตัวอย่างการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการฟื้นตัวกลับในเชิงคุณภาพ เช่น Networked Infrastructure Resilience Assessment Framework (NIRA Framework) และ Transport Resilience Indicator Framework (RIF) เป็นต้น [9, 13] ส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณนั้นจะให้ค่าผลลัพธ์ทางคณิตศาสตร์ออกมาด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จึงเป็นค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ถูกวัดค่าออกมาเป็นตัวเลข หรือแบบจำลองโครงสร้างของระบบ [14]

วิธีการวัดค่าความยืดหยุ่นเชิงปริมาณมีหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการสร้างกระบวนการ หรือขั้นตอนในการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยกรอบ NIRA Framework ของ Omer โดย NIRA Framework นั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบโครงสร้างพื้นฐานทุกประเภทที่สามารถแสดงผลในรูปของเครือข่ายได้ ยกตัวอย่างเช่น ระบบเครือข่ายขนส่งสาธารณะ, ระบบการสื่อสารทางวิทยุ, ระบบ Supply Chain เป็นต้น

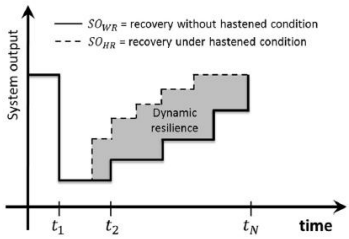


รูปที่ 1 กระบวนการทำงานของ NIRA Framework [9]

การศึกษาความสามารถในการฟื้นตัวของระบบแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Static และ Dynamic Resilience โดยความแตกต่างของทั้งสองคือการใช้ปัจจัยด้านเวลาเข้ามาเป็นส่วนในการวิเคราะห์ โดยที่ Static Resilience นั้น จะไม่นำปัจจัยด้านเวลาเข้ามาในการวิเคราะห์ หลักการนี้จะให้ผลลัพธ์เป็นภาพรวมการกระจายทรัพยากรภายใต้ภาวะความผันผวน และเน้นหนักไปทางด้านการประกันการทำงานของระบบภายใต้เหตุการณ์ดังกล่าว [15] ในขณะที่ Dynamic Resilience จะพิจารณาปัจจัยเวลา และเน้นไปที่ความพยายามในการฟื้นฟูหลังเหตุการณ์ ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวแบบ Dynamic จึงมีความซับซ้อนมากกว่า Static และเป็นกระบวนการวิเคราะห์แบบระยะยาว [15 - 16]



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นเชิงปริมาณแบบ Static Resilience [15]



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นเชิงปริมาณแบบ Dynamic Resilience [15]

2.4 ตัวชี้วัดด้านความสามารถในการเชื่อมต่อ

มุมมองในการวัดประสิทธิภาพของระบบขนส่งสามารถกระทำได้ใน 3 มุมมอง คือ Traffic, Mobility, และ Accessibility ซึ่งหมายถึง การจราจร, ความคล่องตัว, และการเข้าถึงได้ ตัวชี้วัดในด้าน Traffic และ Mobility ใช้การวัดประสิทธิภาพของระบบขนส่งจากความเร็วของยานพาหนะ และปริมาณยานพาหนะที่ใช้งานระบบ (Vehicle Speed and Vehicle Utilization) ในขณะที่ตัวชี้วัดด้าน Accessibility ใช้การวัดประสิทธิภาพการขนส่งจากหลายมุมมองซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถที่ผู้ใช้งานจะสามารถเข้าถึงบริการขนส่งได้ ตัวอย่างตัวชี้วัดในหมวดนี้ เช่น ความสามารถในการเชื่อมต่อ (Connectivity), เสถียรภาพการทำงานของระบบ (Reliability) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ตัวชี้วัดในด้าน Accessibility จึงแสดงวัตถุประสงค์ของระบบขนส่งได้ดีที่สุด [17]

ตัวชี้วัดด้านความสามารถในการเชื่อมต่อ Connectivity-based นั้นรวมไปถึง

- ค่า Cyclomatic Number ซึ่งแสดงถึงขนาดของเครือข่าย และจำนวน Node ที่มีการเชื่อมต่อกันในเครือข่ายที่สูงขึ้น

- ดัชนี Alpha, Beta, และ Gamma Index แสดงอัตราส่วนของ Cycle Number ต่อ Cycle Number สูงสุดที่เป็นไปได้, อัตราส่วนระหว่างจำนวนของ Link ต่อ จำนวนของ Node, และอัตราส่วนจำนวน Link ของเครือข่ายต่อ จำนวน Link มากที่สุดที่เป็นไปได้ ตามลำดับ

- Average Degree คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนของ Arc Incident บน Node ในเครือข่าย ค่าดัชนี Alpha, Beta, Gamma และ Average Degree ที่สูงแสดงถึงค่าความสามารถในการเชื่อมต่อที่สูงขึ้นด้วย

ตัวชี้วัดเหล่านี้สามารถคำนวณได้ ดังนี้

Cyclomatic Number

$$\mu = e - v + p, \mu \geq 0 \quad (1)$$

Alpha Index

$$\alpha = \frac{e-v+p}{2v-5}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

Beta Index

$$\beta = \frac{e}{v}, \beta \geq 0 \quad (3)$$

Gamma Index

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}, 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

Average Degree

$$AD = \frac{\sum_i n_i}{v}, AD \geq 0 \quad (5)$$

โดยที่ e คือจำนวนของ Link, v เป็นจำนวนของ Nodes, p คือจำนวนของ Isolated Plot, μ แทนค่า Cyclomatic Number, α คำนวณได้จากการนำจำนวน Cyclomatic Number หารด้วย จำนวน Cyclomatic Number ที่เป็นไปได้, β หาได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวน Link หารด้วยจำนวน Node, γ คืออัตราส่วนระหว่าง Link ในเครือข่ายหารด้วย Link มากที่สุดที่เป็นไปได้, Average Degree คือค่าเฉลี่ย Link ต่อ Node

ตัวอย่างของตัวชี้วัด Centrality-Based เช่น Degree Centrality ซึ่งหมายถึงจำนวนของ Link ที่เชื่อมต่อกับ Node ใด ๆ จำนวน Link ที่เชื่อมต่อโดยตรงที่มากขึ้น แสดงว่ามีค่า Centrality สูง [18] ค่า Degree Centrality หาได้จาก

$$C_{deg}(i) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \quad (6)$$

โดยที่ , $C_{deg}(i)$ คือค่า Degree Centrality ของ Node i, a_{ij} มีค่าเป็น 1 ถ้ามี Link เชื่อมต่อโดยตรงระหว่าง Node i และ j, และ 0 ในกรณีอื่น

เส้นทางที่สั้นที่สุดโดยเฉลี่ย (Average Shortest Path) ใช้มากในงานวิจัยเช่นกัน เส้นทางที่สั้นที่สุดสามารถหาค่าได้โดยใช้ Dijkstra's Algorithm ซึ่งเสนอโดย Edsger W. Dijkstra ในปี 1956 อัลกอริทึมนี้ถูกออกแบบมาเพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง Node สอง Node ในกราฟ [19] โดยเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$a = \sum_{s,t \epsilon V} \frac{d(s,t)}{n(n-1)} \quad (7)$$

โดยที่ V คือ เซ็ตของ Node ในกราฟ G, $d(s,t)$ คือเส้นทางที่สั้นที่สุดจาก s ไป t, และ n คือจำนวนของ Node ในกราฟ G

ค่า Resilience Index หรือ ดัชนีความสามารถในการฟื้นตัวของระบบเครือข่าย เป็นอีกตัวชี้วัดที่ประมาณระดับความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการฟื้นตัวกลับของระบบ โดยสามารถคำนวณได้จากการกำจัด Node แบบระบุเป้าหมายซ้ำ ๆ กัน (Targeted Node Removal Strategy, TNRS) ซึ่งจำลองสถานการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบจากอุบัติภัยที่เกิดจากการวางแผน หรือจงใจ และการกำจัด Node แบบสุ่ม (Random Node Removal Strategy, RNRS) ซึ่งเป็นการจำลองอุบัติภัยที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดคิด หรือคาดการณ์ไม่ได้ รวมไปถึงภัยพิบัติทางธรรมชาติด้วย นักวิจัยท่านนี้ได้เสนอว่า จุดที่เกิดการบรรจบกันบนกราฟของความถดถอยของประสิทธิภาพที่เกิดจากกระบวนการ TNRS และ RNRS เรียกว่าจุด วิกฤติ (Critical Point) โดยที่ ณ จุดนี้ ระบบจะมีปฏิกิริยาต่อ TNRS และ RNRS เท่ากัน ระบบเครือข่ายจะถือว่ามีความยืดหยุ่น (Resilient) จนถึงจุดนี้เนื่องจากระบบมีปฏิกิริยา และสามารถต้านทานความผันผวนได้ทั้งสองรูปแบบ หลังจากจุดนี้ เครือข่ายจะสูญเสียความยืดหยุ่น และความสามารถในการฟื้นตัวให้กับความผันผวนที่รบกวนระบบ ค่าที่ได้ ณ จุดวิกฤตินี้คือค่าดัชนีความสามารถในการฟื้นตัวของระบบ หรือ Resilience Index

2.5 ลักษณะทางกายภาพของความผันผวน (Anatomies of Disruptions)

ผู้เชี่ยวชาญได้จัดแยกภัยพิบัติเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ตามแหล่งกำเนิดภัยพิบัติ ได้แก่ ภัยพิบัติที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ และที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ โดยเหตุการณ์เหล่านี้อาจเกิดขึ้นโดยไม่คาดคิด หรืออาจเกิดขึ้นโดยมีการวางแผนล่วงหน้า [20] งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าภัยพิบัติต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อระบบขนส่งแตกต่างกันตามคุณลักษณะของภัยพิบัตินั้น ๆ [21]

งานวิจัยของ Jenelius และ Mattson ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายเป็นจุด และที่สร้างความเสียหายเป็นพื้นที่ โดยพวกเขาเสนอว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบใด ๆ เป็นจุดสร้างความเสียหายต่อประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อน้อยกว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นครอบคลุมพื้นที่เป็นวงกว้าง ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่สร้างความเสียหายต่อระบบเครือข่ายเป็นจุด เช่น การปิดถนน, อุบัติเหตุบนเส้นทางสัญจร, และความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อสถานี ความเสียหายที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจมีตั้งแต่การเพิ่มระยะเวลาเดินทาง, Delay, การจราจรติดขัดระยะสั้น ๆ ไปจนถึงเกิดการจราจรติดขัดระยะยาว และความเสียหายทางเศรษฐกิจในวงกว้าง [22] ภัยพิบัติที่สร้างความเสียหายเป็นวงกว้าง เช่น พายุเฮอริเคน, แผ่นดินไหว, น้ำท่วมฉับพลัน หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การก่อการร้าย, การยกเลิกรูปแบบการขนส่ง, และการประท้วง สามารถสร้างความเสียหายครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่า และส่งผลให้การฟื้นฟูกลับจากสภาวะที่ถูกทำลายนั้นยาก และยาวนานกว่า Attoh-Okine และ Ivey-Burden ได้กล่าวว่าภัยพิบัติทางธรรมชาติส่วนใหญ่สร้างความเสียหายแบบสุ่ม และภัยจากการกระทำของมนุษย์ที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อระบบมีความเจาะจง มักคาดการณ์ได้มากกว่า [20]

3. การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นของระบบรางในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความยืดหยุ่น หรือสามารถในการฟื้นตัว ของระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย เพื่อสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ความสามารถในการฟื้นตัวของเครือข่ายที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยการนำรูปแบบการจัดเรียงเส้นทาง และสถานีรถไฟทางกายภาพมาปรับให้อยู่ในรูปของการแสดงผลด้วยกราฟซึ่งประกอบด้วย Link แทนเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่าง Node ที่แสดงแทนสถานีรายทาง จากนั้นทำการวิเคราะห์เครือข่ายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การคำนวณและตัวชี้วัด

ในการวิเคราะห์ระบบขนส่งทางรางของไทยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการศึกษาโดยการแปลงเครือข่ายกายภาพของระบบขนส่งเป็นเครือข่ายในรูปของกราฟ โดยเส้นทางการเดินทางของรถไฟเป็น Link และสถานีรายทาง และชุมทางต่าง ๆ ถูกแสดงด้วย Node การกำหนดนิยาม

ของ “Resilience” หรือความยืดหยุ่น สำหรับงานวิจัยนี้ คือ “Resilience คือ ความสามารถของระบบในการต่อต้าน และคงสภาพการทำงานระหว่างประสบกับเหตุการณ์ความผันผวน และสามารถที่จะฟื้นตัวกลับมาในสภาวะที่ยอมรับได้ภายหลังเหตุการณ์นั้น ๆ” สำหรับคำจำกัดความที่ได้เสนอไปสามารถอนุมานได้ว่า ภายใต้ภาวะกดดันต่อระบบขนส่ง (เช่น การประสบภัยพิบัติ หรือการใช้งานทั่วไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง) ระบบขนส่งที่มีความสามารถในการฟื้นตัวดีจะสามารถดำรงการทำงานภายใต้สภาวะกดดันได้ และหลีกเลี่ยงการเกิดความล้มเหลวโดยสมบูรณ์ ดังนั้นระบบจึงจะสามารถที่จะฟื้นคืนกลับมาในระดับปกติภายใต้ระยะเวลา และโดยการใช้ทรัพยากรที่เหมาะสม เพื่อที่จะบรรลุข้อเสนอนี้ ค่าความสามารถในการฟื้นตัวของระบบจะต้องสามารถประเมิน หรือวัดค่าได้เพื่อที่จะสามารถประมาณค่าความถดถอยของประสิทธิภาพ และสถานภาพของความสามารถในการฟื้นตัวหลังการปรับปรุงระบบได้

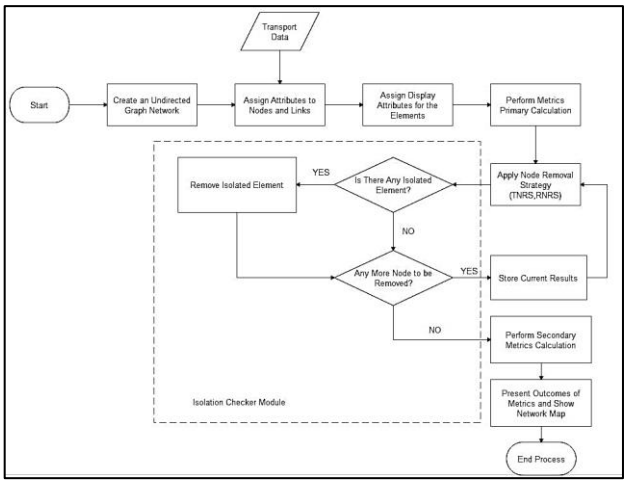
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ตัวชี้วัดด้าน Accessibility Based ในการศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของระบบรางดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวชี้วัด **Connectivity-based** ที่ใช้ในการศึกษา

ตัวชี้วัด		คำอธิบาย
กราฟ		
1	Diameter	ความยาวของเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างสอง Node ที่อยู่ห่างไกลกันที่สุด เป็นการวัดความกว้างของกราฟและความยาวเชิงโครงสร้างระหว่างสอง Node
2	Link Density	อัตราส่วนระหว่างจำนวน Link ทั้งหมดในเครือข่ายต่อจำนวน Link ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ที่เครือข่ายสามารถรับได้ หากทุก Node สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยสมบูรณ์
3	Average Node Degree	ค่าเฉลี่ยของการกระจายค่า Node-degree
4	Average Shortest Path Distance	ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่าง Node ทุกคู่ในเครือข่าย
5	Number of Cycle	จำนวนวงรอบอิสระที่มากที่สุดในกราฟ
Connectivity		
1	Alpha Index	วัดค่า Connectivity โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวงรอบในกราฟ ต่อวงรอบมากที่สุดที่เป็นไปได้
2	Beta Index	วัดระดับการเชื่อมต่อโดยอาศัยอัตราส่วนระหว่าง Link ต่อ Node
3	Gamma Index	วัดค่าการเชื่อมต่อโดยใช้อัตราส่วนระหว่าง Link ในเครือข่าย ต่อ จำนวน Link มากที่สุดที่เป็นไปได้ในเครือข่ายนั้น

3.2 กลไกแบบจำลอง

เครือข่ายระบบขนส่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของเครือข่ายกราฟ เพื่อที่จะสามารถทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครือข่ายได้ ในการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นจากกราฟ รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบ และนำเสนอในการศึกษานี้



รูปที่ 4 กลไกแบบจำลองการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นของเครือข่าย

3.3 การสร้างแบบจำลองระบบรางของประเทศไทย

ในการสร้างแบบจำลองพื้นฐานของการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างเครือข่ายความสัมพันธ์ของระบบรถไฟในประเทศไทย โดยใช้เครือข่ายการขนส่งระบบรางที่ใช้งานในปัจจุบันเป็นแบบจำลองพื้นฐาน (Base Model) โดยมีสถานีรถไฟเป็น Node และเส้นทางการให้บริการเป็น Link เครือข่ายที่สร้างขึ้นเป็นการสร้าง MultiGraph บน NetworkX เพื่อแสดงแทนความสัมพันธ์ของเครือข่าย สำหรับเส้นทางการให้บริการที่เป็นระบบทางคู่หรือทางสาม จะใช้การเพิ่ม Link ออกมาจาก Node เดิม เมื่อได้เครือข่ายพื้นฐานแล้วสามารถหาค่าความสามารถในการเชื่อมต่อของระบบในปัจจุบันและใช้ค่าพื้นฐานนี้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับขั้นตอนต่อไปในการศึกษาครั้งนี้

เนื่องจากความยืดหยุ่นจะวัดค่าได้จากการฟื้นกลับหรือความสามารถในการต้านทานภัยพิบัติแบบต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวไว้ดังนี้

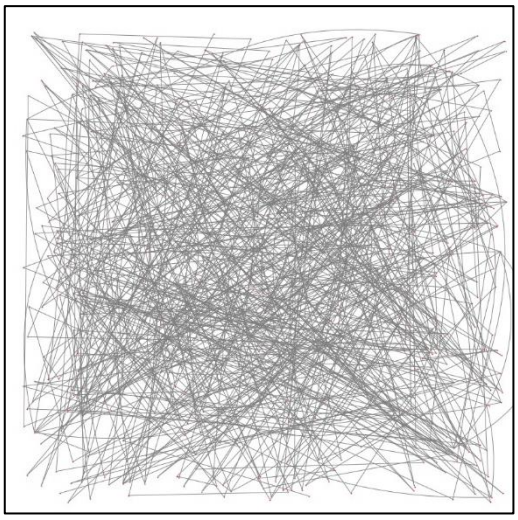
3.3.1 Targeted Node Removal Strategy (TNRS)

เป็นการกำจัด Node แบบเฉพาะเจาะจง โดยจำลองเหตุการณ์ที่จงใจโจมตีที่จุดใดจุดหนึ่งโดยเฉพาะบนเครือข่าย ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด ความเสียหายจะเกิดขึ้นมากที่สุด ณ จุดที่มีความสำคัญสูงที่สุด การวิเคราะห์ความสำคัญของ Node นี้สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ Centrality Analysis

3.3.2 Random Node Removal Strategy (RNRS)

เป็นการกำจัด Node แบบสุ่ม โดยเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เหตุการณ์ความผันผวนเกิดขึ้นบนเครือข่ายแบบไม่สามารถคาดการณ์ได้ เช่น

เหตุการณ์ที่เกี่ยวเนื่องกับสภาพอากาศ เป็นต้น กลยุทธนี้ถูกออกแบบมาให้แต่ละ Node ในเครือข่ายสามารถได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติเท่า ๆ กัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของเครือข่ายระบบรางของไทยแสดงผลบน NetworkX

รูปที่ 6 แผนที่เส้นทางรถไฟ และโครงการก่อสร้างทางรถไฟเพิ่มเติม [23]

4. ผลการวิจัย

4.1 ค่าประสิทธิภาพการเชื่อมต่อพื้นฐานของระบบราง

จากการทำการวิเคราะห์เครือข่ายการขนส่งระบบรางในประเทศไทยที่ใช้งานในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าเครือข่ายขนส่งทางรางของไทยมีขนาด 4,357 กิโลเมตร และมี Diameter 313 กิโลเมตร ซึ่งเป็นการแสดงขนาดความกว้างของระบบเครือข่ายระบบราง

เครือข่ายปัจจุบันมีค่าเฉลี่ยของ Link ที่เชื่อมต่อกับ Node ที่ 2.2769 Link ต่อ Node จากค่า Link Density ที่ 0.0037 หมายความว่าเครือข่ายพื้นฐานนี้มีค่าการเชื่อมต่อแท้จริงแค่ 0.37% จากค่าการเชื่อมต่อโดยรวมที่สามารถเป็นไปได้ ซึ่งอยู่ห่างจากค่าความหนาแน่นสมบูรณ์อยู่มาก (100%)

ตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อพื้นฐานของระบบราง

Parameter	Value
Diameter	313
Link Density	0.0037
Average Node Degree	2.2769
Average Shortest Path Distance	604
Cyclomatic Number	86
Alpha Index	0.0703
Beta Index	1.1384
Gamma Index	0.3799
Number of Node	614
Number of Link	699

4.2 ผลลัพธ์จากการจำลอง Targeted Node Removal Strategy

การหาค่าความสามารถในการเชื่อมต่อของระบบแบบ Targeted Node Removal Strategy (TNRS) เป็นการวิเคราะห์แบบ Centrality Analysis หรือ การวิเคราะห์จุดสำคัญในเครือข่าย เนื่องจาก Node ที่สำคัญที่สุดของระบบคือ สถานีชุมทางบ้านภาชี (BPJ) ดังนั้น สถานี BPJ จึงเป็นสถานีแรกที่จะถูกนำออกจากระบบ การนำ BPJ ออกจากระบบ จะทำให้ Link ที่เชื่อมต่อ Node โดยตรงถูกนำออกจากแบบจำลองด้วย รวมไปถึงกลุ่มเส้นทางอิสระ ที่ถูกแยกออกจากระบบด้วย จากการที่ BPJ ถูกนำออกจากระบบ ทำให้เครือข่ายนี้สูญเสีย Node จาก Isolation Checker ไปทั้งหมด 102 Node คิดเป็นประมาณ 16.11% ของทั้งหมด

ผลจาก TNRS ยังพบว่า เมื่อ BPJ ถูกแยกออกไป ทำให้ขนาดของระบบลดลงเหลือ 3,233 กิโลเมตร และ Diameter ลดลงเหลือ 291 กิโลเมตร โดยทางรถไฟสายเหนือถูกตัดขาดออกจากระบบหลัก และถือว่าไม่สามารถใช้การได้อีก (Isolation Checker) ค่าของ Link Density มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างจำนวน Node และ Link เปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ยของ Average Node Degree ลดลง 0.2769 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยของ Link ที่เชื่อมต่อแต่ละ Node ลดลง

ค่า Alpha, Beta, และ Gamma Index แสดงให้เห็นถึงความถดถอยของประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อของระบบขนส่ง และประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่ายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Node และ Link จาก TNRS

เมื่อทำซ้ำกระบวนการ TNRS จะพบว่า ความสามารถของระบบขนส่งได้ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความสามารถในการเชื่อมต่อระบบ การทำซ้ำสามารถทำได้จนกระทั่งระบบสูญเสียความสามารถในการเชื่อมต่อโดยสมบูรณ์ (ค่า Alpha, Beta, Gamma Index = 0 และ จำนวน Link = 0)

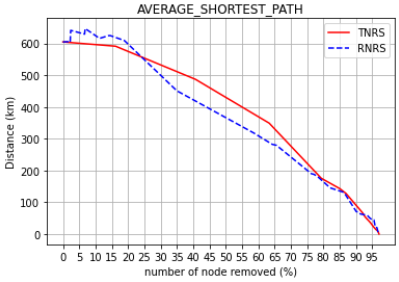
4.3 ผลลัพธ์จากการจำลอง Random Node Removal Strategy

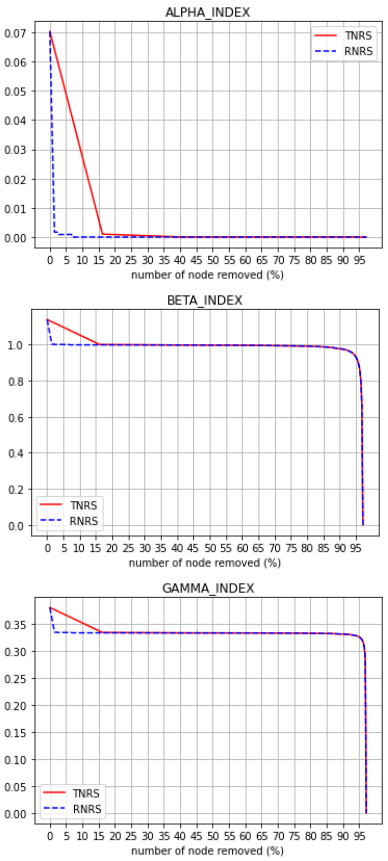
เนื่องจาก Random Node Removal Strategy (RNRS) เป็นการตัด Node ออกจากระบบโดยการสุ่มโดยให้ลำดับความสำคัญของ Node ที่ถูกตัดออกมีค่าเท่า ๆ กัน ต่างจาก TNRS ที่ใช้การตัด Node ออกตามลำดับความสำคัญ (Node Centrality) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อของระบบจะมีการถดถอยลงน้อยกว่า TNRS เนื่องจากโอกาสที่ Node ที่มีความสำคัญมากจะได้รับความเสียหายนั้นมีน้อยกว่าแบบ TNRS ผลกระทบจากการตัด Node จึงสร้างความเสียหายให้กับ Node และ Link ของระบบน้อยกว่า จากการทำซ้ำ RNRS พบว่า ระบบจะเข้าสู่สภาวะสูญเสียความสามารถในการเชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์เมื่อ Node ถูกนำออกไปจากระบบโดยเฉลี่ย 29 Node หรือคิดเป็น 4.58% จาก Node ทั้งระบบ

4.4 ดัชนีความยืดหยุ่น (Resilience Index)

การหาค่า Resilience Index สามารถหาได้จากการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของ Node ที่ถูกตัดออกไป ณ จุดบรรจบกันของกราฟแสดงความถดถอยของความสามารถในการเชื่อมต่อของระบบเครือข่าย เมื่อทำการจำลองด้วย TNRS และ RNRS โดยในการศึกษานี้จะใช้กราฟของค่า Average Shortest Path, Alpha, Beta, และ Gamma Index เป็นตัวชี้วัดเนื่องจากค่าทั้งสี่แสดงความสามารถในการเชื่อมต่อของเครือข่ายได้ชัดเจน

จากการวิเคราะห์ทั้ง TNRS และ RNRS จะพบว่า มีเพียงกราฟของ Average Shortest Path เท่านั้น ที่สามารถหาจุดตัดกราฟได้อย่างชัดเจน ก่อนที่ระบบจะล้มเหลวโดยสิ้นเชิง ณ จุดตัดกราฟนี้ ระบบเครือข่ายมีปฏิกิริยาต่อภัยพิบัติที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งไม่สามารถวางแผนล่วงหน้าได้ (RNRS) และภัยพิบัติที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ (TNRS) ได้เหมือนกัน โดยจุดตัดเกิดขึ้นเมื่อระบบสูญเสีย Node ไปประมาณ 23% ของจำนวน Node ทั้งหมด หรือเท่ากับ 141 Node ดังนั้น เครือข่ายระบบขนส่งทางรางของประเทศไทย ณ ปัจจุบัน มีค่าความสามารถในการฟื้นตัว (resilience index) อยู่ที่ 0.23 หรือ 23% ค่า Resilience Index นี้ สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบความสามารถในการเชื่อมต่อ และความสามารถในการฟื้นตัวของระบบระหว่างเครือข่ายระบบขนส่งอื่น ๆ ได้





รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัด และจำนวน Node ที่ถูกนำออกจากระบบ (Base Model)

4.5 ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของระบบเมื่อปรับปรุงด้วย Resilience Enabling Schemes (RES)

Resilience Enabling Scheme (RES) คือ หลักการออกแบบที่ใช้สำหรับการเตรียมความพร้อมของระบบโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับต่อเหตุการณ์ความเสียหายต่อระบบที่ไม่คาดคิด ความเสียหายต่อระบบนี้ ในบางครั้งสามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่บางครั้งก็ไม่สามารถคาดการณ์ถึงตำแหน่งและความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อระบบได้ หลักการของ Resilience จึงเป็นการช่วยให้ระบบโครงสร้างพื้นฐานสามารถต้านทาน หรืออยู่รอดจากการทำลายของภัยพิบัติที่เกิดขึ้น รวมไปถึงลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์เหล่านั้นได้อีกด้วย

หลักการของความยืดหยุ่น (Resilience) นั้นประกอบด้วยสององค์ประกอบ ได้แก่ Vulnerability หรือ ความเปราะบาง และ Adaptive Capacity หรือ ความสามารถในการปรับตัว คุณสมบัติของ Vulnerability ทำให้ระบบเผชิญต่อความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายเมื่อเกิดภัยพิบัติ ในขณะที่ Adaptive Capacity ช่วยให้ระบบสามารถดำเนินงานต่อไปได้ในขณะที่เกิด หรือภายหลังจากการเกิดเหตุผันผวน ระบบสามารถบรรลุ หรือพัฒนาความสามารถในการฟื้นตัว (Resilience) ได้โดยการลดความเปราะบางให้ต่ำมากที่สุด และเสริมสร้างความสามารถในการปรับตัวให้มากที่สุด RES ที่ส่งผลต่อระดับของความเปราะบางของระบบ ได้แก่ ปริมาณ

ความจุสำรอง (Redundancy), ความหลากหลาย (Diversity), ความแข็งแกร่ง (hardening), ความอดทนของความจุ (Capacity Tolerance) และความเป็นโมดูลาร์ (Modularity) RES ด้านความสามารถในการปรับตัว ได้แก่ การจัดการทรัพยากร (Resource Allocation), การเตรียมความพร้อม (Preparedness), ความร่วมมือ (Collaboration) และความรู้ความเข้าใจ (Cognition)

เนื่องจากระบบการขนส่งทางรางของประเทศไทยมีโครงการขยาย และพัฒนาระบบขนส่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อทั้งในประเทศ และในภูมิภาคเอเชีย ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นตามแผนงานจึงถูกเพิ่มเติมในแบบจำลอง เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเชื่อมต่อและความเปลี่ยนแปลงของ Resilience Index

แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์สำหรับเครือข่ายการขนส่งทางรางใหม่ที่ถูกพัฒนาตามแผนการพัฒนาระบบรางถูกสร้างขึ้น โดยมีการเพิ่มเติมเส้นทางรถไฟทางคู่จำนวน 17 เส้นทาง เส้นทางสาย East-West Corridor 2 เส้นทาง โดยในการวิจัยครั้งนี้จะไม่นำโครงการรถไฟความเร็วสูงมารวมในการศึกษาครั้งนี้ โครงการก่อสร้างทางรถไฟเหล่านี้ เป็นการนำ RES มาใช้โดยการเพิ่ม Redundancy ให้กับระบบจากการเพิ่มทางเดินรถจากทางเดี่ยวเป็นทางคู่ ทำให้สามารถให้บริการขนส่งได้ แม้เกิดความขัดข้องบนทางเดินรถใดทางหนึ่ง

Base Model ที่ได้รับการพัฒนาด้วย RES ทำให้จำนวน Node และ Link เพิ่มขึ้น 2.77% และ 62.09% ตามลำดับ โดยแบบจำลองใหม่นี้ มีจำนวน Node ทั้งหมด 631 Node และ Link 1,133 เส้นทาง แสดงให้เห็นว่า ระบบมีเส้นทางที่สามารถใช้เป็นเส้นทางสำรองได้มากขึ้น และครอบคลุมพื้นที่มากขึ้นด้วย

ขนาดของเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มขึ้นมากถึง 143% ค่า Cyclomatic Number ที่เพิ่มมากขึ้นถึงเกือบ 5 เท่าตัว แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนที่เพิ่มมากขึ้นของระบบนี้ ค่า Alpha, Beta, และ Gamma Index ที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่า RES ช่วยส่งเสริมความสามารถในการเชื่อมต่ออย่างมาก ในขณะที่ค่า Average Shortest Path มีระยะทางเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเครือข่ายทำให้ระยะทางที่ใช้ในการคำนวณมีค่ามากขึ้นด้วย

เนื่องจากโครงการก่อสร้างทางรถไฟทางคู่ที่เพิ่มเติมจากระบบทางเดี่ยว ทำให้จำนวน Link ที่เชื่อมต่อ Node เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Average Node Degree เพิ่มเป็น 3.59 หมายความว่า โดยเฉลี่ยแล้ว แต่ละ Node จะมี Link เชื่อมต่อกับสถานี 3.59 Link

โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ Node ที่มีค่า Centrality สูงที่สุดเปลี่ยนไปเป็น สถานีชุมทางหนองปลาดุก (NPJ) โดยมีค่า Node Centrality ที่ 0.0127 สำหรับการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการเชื่อมต่อ

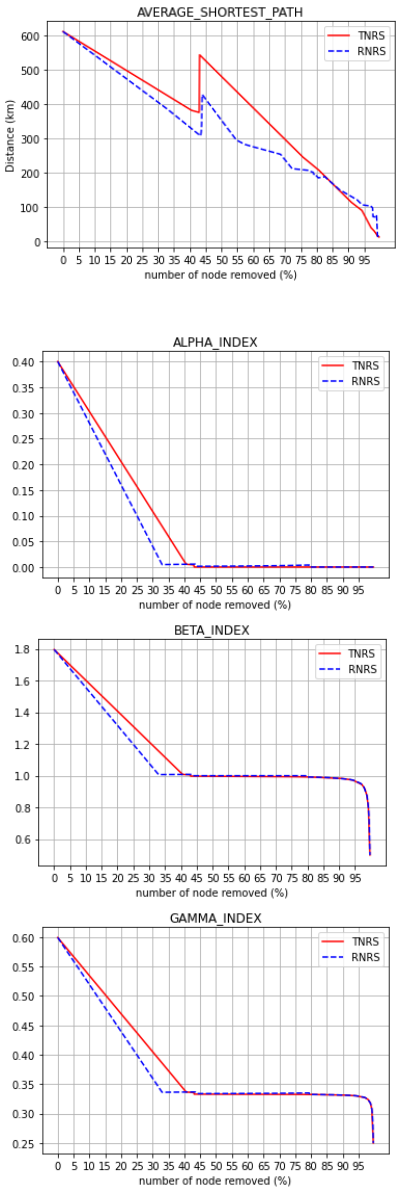
ตารางที่ 3 ความสามารถในการเชื่อมต่อของระบบหลังจากปรับปรุงด้วย RES

Parameter	Original Value	RES Value	% Change
Diameter (km)	313	313	0.00%
Size (km)	4,357	10,593	143.13%
Link Density	0.0037	0.0057	54.05%
Average Node Degree	2.2769	3.5911	57.72%
Average Shortest Path (km)	604	612	1.32%
Cyclomatic Number	86	503	484.88%
Alpha Index	0.0703	0.4001	469.13%
Beta Index	1.1384	1.7955	57.72%
Gamma Index	0.3799	0.5991	57.70%
Number of Node	614	631	2.77%
Number of Link	699	1,133	62.09%

เมื่อนำแบบจำลองเครือข่ายที่ถูกปรับปรุงด้วย RES มาทำการจำลองเหตุการณ์ความผันผวนด้วย TNRS และ RNRS พบว่า ถึงแม้ว่าเครือข่ายใหม่ที่ได้จะมีความสามารถในการเชื่อมต่อสูงกว่าระบบปัจจุบันอยู่มาก แต่เนื่องจาก NPJ กลายเป็น Node ที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมี Link เชื่อมต่อกับตัว Node หลายเส้นทาง ทำให้การใช้ TNRS ในครั้งแรกที่ทำให้ NPJ หายไปจากระบบส่งผลให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อเครือข่ายโดยรวม เนื่องจากเส้นทางการเดินรถไฟสายใต้ถูกตัดขาดออกจากระบบหลัก ทำให้มี Node ถูกตัดขาดมากถึง 272 Node คิดเป็น 43% ของจำนวน Node ทั้งหมด จากรูปที่ 8 แผนภูมิ Average Shortest Path พบว่ากราฟมีจุดตัดกันสองจุด ที่ประมาณ 85% ในขณะที่กราฟของ Beta และ Gamma Index มีค่าราว ๆ 40% ดังนั้นค่าดัชนีความสามารถในการฟื้นตัวของเครือข่ายการขนส่งระบบรางที่ได้รับการปรับปรุงด้วย RES มีค่าดัชนีความสามารถในการฟื้นตัวที่ 0.40 หรือ 40% เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.17 หรือ 17%

5. บทสรุป

ปัจจุบัน การศึกษาความสามารถในการฟื้นตัว หรือ Resilience ในระบบเครือข่ายโครงสร้างพื้นฐานมีวิธีการที่หลากหลาย และมุมมองด้าน Resiliency ที่แตกต่างกันไปตามแต่ละสาขาวิจัย อย่างไรก็ตาม หลักการสำคัญของ Resilience นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือ ความสามารถของระบบในการต่อต้าน และคงสภาพการทำงานระหว่างประสบกับเหตุการณ์ผันผวน และสามารถที่จะฟื้นตัวกลับมาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ภายหลังเหตุการณ์นั้น ๆ



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวชี้วัด และจำนวน Node ที่ถูกนำออกจากระบบหลังจากปรับปรุงด้วย RES แล้ว

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถวัดค่าความสามารถในการฟื้นตัวของโครงสร้างเครือข่ายทางกายภาพได้ รวมทั้งสามารถกำหนดจุดวิกฤต และสถานีสำคัญที่มีบทบาทสำคัญต่อระบบขนส่งโดยรวม ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ และวางแผนด้านการขนส่ง

จากการทดสอบนี้พบว่า Node ที่มี Centrality สูงจะส่งผลกระทบต่อระบบเครือข่ายมากกว่า Node ที่มีค่า Centrality ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อ Node เหล่านี้ถูกตัดออกจากระบบ จะก่อให้เกิดการแยกตัวของ Link กับ Node จำนวนมาก ทำให้ค่าการเชื่อมต่อลดลงอย่างรวดเร็ว

การวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่น และ Centrality Analysis พบว่า ระบบเครือข่ายรถไฟไทยในปัจจุบันมีสถานีชุมทางสำคัญที่มีเส้นทางการเชื่อมต่อมากที่สุด คือ สถานีชุมทางบ้านภาชี (BPJ) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อทางรถไฟไปยังภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกฉียงเหนือได้ ส่วนสถานีกลางบางซื่อ และสถานีชุมทางแก่งคอย มีความสำคัญรองลงมา ดังนั้น ผู้บริหารควรตระหนัก และให้ความสำคัญกับชุมทางเหล่านี้ไม่ให้เกิดความขัดข้องจนชำรุดยาวนาน อันจะเกิดผลกระทบต่อเครือข่ายระบบรางโดยรวมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Dr. Thomas H. Wakeman III ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ และมุมมองด้าน Resiliency ให้กับผู้วิจัย ตลอดจนความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Rodrigue, J.-P. (2020). *The Geography of Transport Systems*. Routledge, pp.1-14.

[2] ดร. ภาวิณี เอี่ยมตระกูล. (2556). *การวางแผนเมืองและการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่ง*. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[3] Eshghi, K. & Larson, R.C. (2008). *Disasters: lessons from the past 105 years*. Disaster Prevention and Management, 17(1), 62-82.

[4] Merriam-Webster. (2020). Definition of Resilience. Retrieved April 10, 2019, from https://www.merriam-webster.com/dictionary/resilience

[5] Holling, C.S. (1973). *Resilience and Stability of Ecological Systems*. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1-23.

[6] Ouyang, M., & Wang, Z. (2015). *Resilience Assessment of Interdependent Infrastructure Systems: With a Focus on Joint Restoration Modeling and Analysis*. Reliability Engineering and System Safety, 141, 74-82.

[7] Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., & von Winterfeldt, D. (2003). *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance Seismic Resilience of Communities*. Earthquake Spectra, 19(4), 733-752.

[8] Konstantinidou, M.A., Kepaptsoglou, K.L., & Karlaftis, M.G. (2014). *Transportation Network Post-Disaster Planning and Management: A Review*. International Journal of Transportation, 2(3), 1-16.

[9] Omer, M. (2013). Resilience of Networked Infrastructure Systems: The Analysis and Measurement (Vol.3). *World Scientific*.

[10] Martinson, R. (2017). Resilience in a Transportation System: A Whole System Approach. *Transportation Research Circular*, Number E-C226, 1-9.

[11] Bell, M.G., & Iida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis*. John Wiley & Sons.

[12] Khumpraphan, S., Bucar, R., & Hayeri, Y. (2020). *Measuring Resilience in Multimodal Transportation Systems*. Master's Thesis, Stevens Institute of Technology, New Jersey, USA.

[13] Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2014). Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(1).

[14] Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2015). A Review of Definitions and Measures of System Resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 47-61.

[15] Rose, A. Z. (2009). *Economic Resilience to Disasters*. Retrieved from Published Articles & Papers, Paper 75: http://research.create.usc.edu/published_papers/75

[16] Mattsson, L. G., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research. *Transportation Research Part A*, 81, 16-34.

[17] Litman, T. (2011). Measuring Transportation: Traffic, Mobility, and Accessibility. *Institute of Transportation Engineers*, 73(10), 28-32.

[18] Wang, L., Mo, H., Wang, F., & Jin, F. (2011). Exploring the Network Structure and Nodal Centrality of China's Air Transport Network: A Complex Network Approach. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 712-721.

[19] Gass, S., & Fu, M. (2013). Dijkstra's Algorithm. *Encyclopaedia of Operations Research and Management Science*. doi:10.1007/978-1-4419-1153-7

[20] Attoh-Okine, N. O. (2016). *Resilience Engineering Models and Analysis*. Cambridge University Press.

[21] The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Freight Transportation Resilience in Response to Supply Chain Disruptions.* The National Academies Press.

[22] Jenelius, E., & Mattsson, L.-G. (2012). Road Network Vulnerability Analysis of Area-Covering Disruptions: A Grid-Based Approach with Case Study. *Transportation Research Part A*, 46, 746-760.

[23] การรถไฟแห่งประเทศไทย. (2561). *แผนที่เส้นทางรถไฟ*. สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2564, จาก https://www.railway.co.th/More/Knowledge_Detail?value1=00DE5502B5AA7B42A92BE9FF953D8EBD01000000762C6E93CD65218434B6AE9E792F380DA3C89B8AA027A48AC6A03F0D45C5041A&value2=00DE5502B5AA7B42A92BE9FF953D8EBD01000000FA048A4BAA8C347E99A3D6A1192E61D60FF1415C5B253C7FA5746A585D40261F&value3=00DE5502B5AA7B42A92BE9FF953D8EBD01000000CC211B7CDEC5641A3A74CBC498987C5545038D331C4645221BC0ECFDB40AA63D